DAN COMȘA

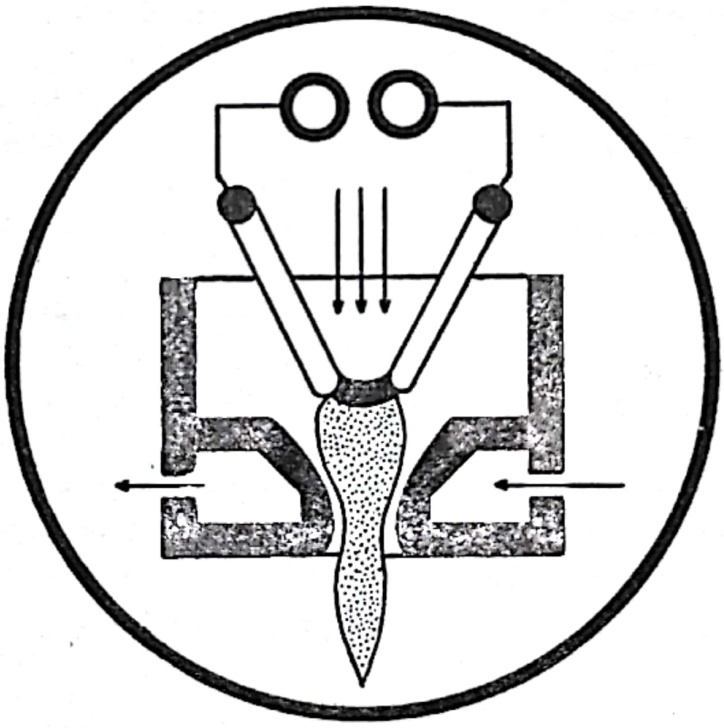
UTILIZĂRI ALE ENERGIEI ELECTRICE

EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ
BUCUREȘTI, 1973

Scanned with OKEN Scanner

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI ÎNVĂȚĂMÎNTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC CLUJ
Dr. ing. DAN COMȘA

UTILIZĂRI ALE ENERGIEI ELECTRICE



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Posibilitățile de folosire a energiei electrice sînt multiple și variate. Manualul de față abordează în concordanță cu programa de curs a disciplinei „Utilizări ale energiei electrice", următoarele domenii: instalații electrice de distribuție la consumator, iluminatul electric, electrotermie, sudarea electrică, electrochimie și electrometalurgie, prelucrarea electrică a metalelor.

Ținînd cont de dinamica de dezvoltare a fiecărui domeniu în parte, în lucrare sînt prezentate fenomenele de bază, procedeele și echipamentele electrice care permit utilizarea industrială, actuală și de perspectivă, a energiei electrice; pe baza principiilor teoretice se stabilesc elementele de calcul specifice, însoțite de exemplificări numerice.

Lucrarea se adresează studenților facultăților de electrotehnică și energetică, precum și inginerilor din ramura electrotehnică care se ocupă cu proiectarea, executarea sau întreținerea instalațiilor electrice ce utilizează energia electrică sub diverse forme.

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Capitolul 1 : **Instalaţii electrice de distribuţie la consumator** 9

1.1. Generalităţi 9
1.2. Sarcini electrice de calcul 10
1.3. Instalaţiile electrice de înaltă tensiune ale întreprinderilor industriale 13
1.3.1 Instalaţia de racordare la sistemul energetic 13
1.3.2. Instalaţia de distribuţie în înaltă tensiune 15
1.3.3 Posturi de transformare 17
1.4. Instalaţii electrice de joasă tensiune 26
1.4.1 Schemele instalaţiilor electrice de joasă tensiune 26
1.4.2 Materiale şi aparate utilizate în instalaţiile electrice 29
1.5 Calculul instalaţiilor electrice de joasă tensiune 40
1.5.1 Determinarea secţiunii conductoarelor pe baza încălzirii maxime admisibile 41
1.5.2 Pierderea de tensiune 49
1.5.3 Calculul curenţilor de scurtcircuit în reţelele electrice de joasă tensiune 52
1.5.4 Stabilitatea termică şi dinamică la scurtcircuit 57
1.5.5 Protecţia instalaţiilor electrice de joasă tensiune 59
1.6 Îmbunătăţirea factorului de putere în întreprinderile industriale . . 62
1.6.1 Cauzele şi efectele scăderii factorului de putere 63
1.6.2 Îmbunătăţirea factorului de putere cu ajutorul condensatoarelor derivaţie 64
1.6.3 Îmbunătăţirea factorului de putere cu ajutorul motoarelor sincrone 70
1.6.4 Eficienţa economică a îmbunătăţirii factorului de putere . . . 72
1.7. Măsuri de protecţie împotriva tensiunilor de atingere 78

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 2 : **Iluminatul electric** 83

2.1 Noţiuni fundamentale în tehnica iluminatului 83
2.1.1 Mărimi şi unităţi fotometrice 83
2.1.2 Proprietăţile fotometrice ale materialelor 91
2.1.3 Măsurarea mărimilor fotometrice 93
2.1.4 Noţiuni de colorimetrie 97
2.2 Izvoare electrice de lumină 98
2.2.1 Radiaţiile termice 99
2.2.2 Lămpi cu incandescenţă 101
2.2.3 Radiaţiile descărcărilor în gaze sau vapori metalici 105
2.2.4 Lămpi cu descărcări în gaze sau vapori metalici 109
2.2.5 Lămpi fluorescente 117
2.2.6 Plăci electroluminescente 126
2.2.7 Comparaţia izvoarelor electrice de lumină 126
2.2.8 Reglarea fluxului luminos 126
2.3 Corpuri de iluminat 128
2.3.1 Caracteristicile fotometrice şi clasificarea corpurilor de iluminat obişnuite 129
2.3.2 Calculul fluxului luminos al corpurilor de iluminat 132
2.3.3 Proiectoare 135
2.4 Calculul fotometric al instalaţiilor de iluminat 136
2.4.1 Clasificarea instalaţiilor de iluminat 136
2.4.2 Condiţiile de calitate ale iluminatului 137
2.4.3 Metoda coeficienţilor de utilizare pentru calculul valorilor medii ale iluminărilor 142
2.4.4 Metoda punct cu punct pentru calculul iluminărilor directe . . 147
2.4.5 Proiectarea instalaţiilor de iluminat interior 155
2.4.6 Proiectarea instalaţiilor de iluminat exterior 159

Capitolul 3 : **Electrotermie** 162

3.1 Probleme generale ale instalaţiilor electrotermice 162
3.1.1 Clasificarea instalaţiilor electrotermice 163
3.1.2 Indicatori energetici ai proceselor electrotermice 164
3.1.3 Transmiterea căldurii la cuptoarele electrice 165
3.1.4 Materiale utilizate în construcţia cuptoarelor electrice . . . 172
3.1.5 Măsurarea temperaturii 176
3.2 Încălzirea cu rezistoare 180
3.2.1 Cuptoare electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă 180
3.2.2 Elemente încălzitoare (rezistoare) 183
3.2.3 Calculul cuptoarelor electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă 185
3.2.4 Echipamentul electric al cuptoarelor cu rezistoare 195
3.2.5 Instalaţii electrotermice cu rezistoare, cu încălzire directă . . 198
3.2.6 Încălzirea cu radiaţii infraroşii 200
3.2.7 Aparate electrocasnice 206
3.3 Încălzirea prin inducţie 210
3.3.1 Repartizarea curenţilor turbionari în conductoare plane . . . 211

Scanned with OKEN Scanner

3.3.2 Repartizarea curenţilor turbionari în conductoare cilindrice . 219
3.3.3 Transmiterea energiei electromagnetice între inductor şi piesă 223
3.3.4 Sursele de alimentare ale instalaţiilor de încălzire prin inducţie 231
3.3.5 Cuptoare electrice de inducţie cu creuzet 236
3.3.6 Calculul cuptoarelor electrice de inducţie cu creuzet 238
3.3.7 Echipamentul electric al cuptoarelor de inducţie cu creuzet . . 247
3.3.8 Cuptoare electrice de inducţie cu canal 248
3.3.9 Calculul cuptoarelor electrice de inducţie cu canal 253
3.3.10 Echipamentul electric al cuptoarelor de inducţie cu canal . . . 260
3.3.11 Încălzirea în volum a metalelor 261
3.3.12 Călirea superficială a metalelor 266
3.4 Încălzirea dielectrică 271
3.5 Cuptoare electrice cu arc 274
3.5.1 Arcul electric 275
3.5.2 Cuptoare electrice cu arc, cu acţiune directă 278
3.5.3 Echipamentul electric al cuptoarelor cu arc 281
3.5.4 Caracteristicile de funcţionare ale cuptoarelor electrice cu arc 283
3.5.5 Calculul cuptoarelor electrice cu arc 286
3.5.6 Efecte electrodinamice la cuptoarele electrice cu arc 290
3.5.7 Reglarea automată a cuptoarelor electrice cu arc 294
3.5.8 Cuptoare electrice cu arc şi rezistenţă 296
3.5.9 Cuptoare electrice cu arc în vid 298
3.6 Cuptoare cu fascicul de electroni. Cuptoare cu plasmă. 300

Capitolul 4: **Sudarea electrică** 302

4.1 Clasificarea procedeelor de sudare 302
4.2 Sudarea cu arc electric 304
4.2.1 Arcul electric de sudare 305
4.2.2 Surse de alimentare a arcului de sudare 309
4.2.2.1 Surse de curent alternativ pentru sudarea cu arc electric . 312
4.2.2.2 Surse de curent continuu pentru sudarea cu arc electric . 323
4.2.2.3 Comparaţia surselor de curent pentru sudarea cu arc electric 332
4.2.3 Sudarea automată cu arc electric 333
4.3 Sudarea electrică în baie de zgură 334
4.4 Sudarea cu plasmă 336
4.5 Sudarea cu fascicul de electroni 337
4.6 Sudarea cu fascicul de lumină 339
4.7 Sudarea electrică prin presiune 341
4.7.1 Generalităţi 341
4.7.2 Utilaje pentru sudarea electrică prin presiune 343
4.8 Sudarea în înaltă frecvenţă 347
4.9 Sudarea cu energie înmagazinată 349
4.10 Sudarea cu ultrasunete 351

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 5 : **Electrochimie şi electrometalurgie** 353

5.1 Probleme generale 353
5.1.1 Clasificarea conductoarelor 354
5.1.2 Electroliza 355
5.1.3 Elementele constructive ale electrolizoarelor 359
5.1.4 Sursele de alimentare ale instalaţiilor electrochimice 364
5.1.5 Echipamentul electric al instalaţiilor de electroliză 368
5.2 Electroliza soluţiilor apoase ale combinaţiilor metalice 370
5.2.1 Extragerea metalelor prin electroliza soluţiilor apoase 371
5.2.2 Rafinarea electrolitică a metalelor 372
5.2.3 Galvanostegia 373
5.3 Fabricarea electrolitică a hidrogenului şi a oxigenului 375
5.4 Electroliza clorurilor alcaline 376
5.5 Extragerea şi rafinarea aluminiului prin electroliza sărurilor topite 376
5.6 Aplicaţiile tehnice ale fenomenelor electrocinetice 378

Capitolul 6 : **Prelucrarea electrică a metalelor** 380

6.1 Prelucrarea prin electroeroziune 381
6.2 Prelucrarea electrochimică 385
6.3 Prelucrarea anodo-mecanică 386
6.4 Prelucrarea prin contact electric 387
6.5 Prelucrarea electrohidraulică 388
6.6 Prelucrarea electromagnetică 389

Bibliografie 395

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 1

INSTALAŢII ELECTRICE DE DISTRIBUŢIE LA CONSUMATOR

1.1. GENERALITĂŢI

Instalaţiile electrice la consumator cuprind receptoarele electrice şi reţelele de alimentare ale acestora, inclusiv aparatele de conectare, de protecţie şi de măsură corespunzătoare.

Receptoarele electrice se împart în:

— receptoare de iluminat, cuprinzînd lămpi electrice;

— receptoare de forţă, cuprinzînd motoare electrice, cuptoare electrice, agregate de sudare electrică, instalaţii de electroliză, aparate electrocasnice etc.

Instalaţiile electrice se clasifică:

— după caregoria receptoarelor pe care le deservesc: de iluminat, de forţă şi de automatizare, măsură, control (AMC);

— după locul de amplasare: în interiorul clădirilor (industriale, de locuit, social-culturale etc.), în exteriorul clădirilor, în mine, pe vehicule etc.;

— după tensiunea de utilizare: de joasă tensiune (pînă la 1 000 V) şi de înaltă tensiune (peste 1 000 V).

Pentru asigurarea bunei funcţionări a receptoarelor, alimentarea cu energie electrică trebuie să îndeplinească condiţiile: — tensiune constantă; frecvenţă constantă, simetria tensiunilor, continuitatea alimentării. Continuitatea alimentării cu energie electrică este cea mai importantă condiţie calitativă. Din acest punct de vedere consumatorii de energie electrică (totalitatea receptoarelor dintr-un atelier, secţie sau uzină) se împart în trei categorii:

Scanned with OKEN Scanner

— Categoria I: cuprinde consumatorii la care întreruperea alimentării cu energie electrică reprezintă un pericol pentru viața oamenilor sau o pagubă importantă pentru economia națională (deteriorări de utilaje, rebuturi importante, întreruperi de lungă durată în reluarea procesului tehnologic, întreruperea transporturilor electrificate, perturbații în activitatea orașelor cu peste 3 MW putere cerută).

— Categoria II: cuprinde consumatorii la care întreruperea alimentării cu energie electrică conduce la o nerealizare a producției proporțională cu durata întreruperii și cu puterea absorbită.

— Categoria III: cuprinde consumatorii cu sarcini energetice de mică importanță, ca regiuni agricole, întreprinderi mici cu un schimb, unele sarcini energetice comunale.

Recomandări privind încadrarea receptoarelor în cele trei categorii de consumatori sînt date în lucrarea [26].

Alimentarea consumatorilor din categoria I se realizează prin două surse independente una de alta, fiecare putînd asigura energia electrică necesară; pentru consumatorii din categoria II se prevede o sursă suplimentară, care nu este obligatoriu să fie independentă (de exemplu, două cabluri de alimentare, fiecare putînd să preia întreaga sarcină necesară); consumatorii din categoria III au în general o singură alimentare.

Alimentarea cu energie electrică se realizează în prezent de la sistemul energetic, instalația electrică necesitînd o parte de înaltă tensiune și o parte de joasă tensiune.

1.2. SARCINI ELECTRICE DE CALCUL

În proiectarea instalațiilor electrice este necesar să se cunoască puterea electrică absorbită de la rețea: de fiecare receptor în parte, pentru dimensionarea circuitului de alimentare a acestuia; de grupuri de receptoare alimentate de la același tablou de distribuție, pentru dimensionarea coloanei de alimentare a tabloului; de secțiile uzinei, pentru dimensionarea fiderilor și a posturilor de transformare.

Puterea electrică absorbită care se ia în considerare în calcul se numește *puterea cerută* sau *de calcul* și reprezintă puterea activă convențională, de valoare constantă, care produce în elementele instalației electrice (transformatoare, linii etc.) același efect termic ca și puterea variabilă reală.

Puterea cerută P_c se determină din puterea instalată (nominală) P_i, cu ajutorul coeficientului de cerere k_c

$$P_c = k_c \cdot P_i \qquad (1.1)$$

Coeficientul de cerere ține cont de gradul de încărcare și randamentul receptoarelor, de simultaneitatea funcționării acestora și de randamentul rețelei de distribuție. Ca urmare, coeficientul de cerere este exprimat prin relația

$$k_c = \frac{k_i \cdot k_s}{\eta \cdot \eta_r}, \qquad (1.2)$$

în care: k_i este coeficientul de încărcare;
k_s — coeficientul de simultaneitate;
η — randamentul mediu al receptoarelor;
η_r — randamentul rețelei între receptoare și punctul în care se calculează puterea cerută.

Puterea cerută de receptoarele de forță și de iluminat poate fi determinată prin următoarele metode:

— metoda coeficienților de cerere, aplicabilă la un număr mare de receptoare și care permite calcularea puterii cerute globale pe posturi de transformare sau pe întreaga întreprindere;

— metoda formulei binome, care este mai precisă decît metoda coeficienților de cerere, în special pentru un număr redus de receptoare de forță [29];

— metoda duratei de utilizare a puterii maxime cerute care poate fi folosită numai în faza de studiu tehnico-economic a proiectului [2].

În literatura de specialitate [18], [27] se întîlnesc și alte metode avînd la bază elemente de statistică matematică.

Metoda coeficienților de cerere. Se stabilesc puterile instalate P_i pe categorii de receptoare, adică puterile nominale raportate la durata relativă de conectare egală cu unitatea. Puterea activă cerută se determină cu ajutorul relației (1.1), iar puterea reactivă cerută este

$$Q_c = P_c \operatorname{tg} \varphi = P_c \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}, \qquad (1.3)$$

în care cos φ este factorul de putere corespunzător categoriei receptoarelor. Valorile lui k_c și cos φ pentru diferite categorii de receptoare sînt indicate în tabela 1.1.

Tabela 1.1

Coeficientul de cerere k_c și factorul de putere cos φ pentru diferite categorii de receptoare [8]

Receptorul	k_c	cos φ
a. Instalații de forță		
Motoarele bine încărcate cu funcționare continuă ale compresoarelor, ventilatoarelor, pompelor, benzilor rulante, mașinilor de sudare prin puncte etc.	0,75	0,8
Motoarele mașinilor unelte cu acționare individuală și regim de lucru normal (strunguri, mașini de găurit, freze, morteze etc.)	0,20	0,6
Motoarele mașinilor unelte cu acționare individuală și regim de lucru greu (prese de ștanțat cu excentric, strunguri automate, freze pentru roți dințate etc.).	0,25	0,6
Motoarele mașinilor unelte cu acționare individuală și regim de lucru foarte greu (mori cu bile, mașini de sfărîmat, mașini de forjat și trefilat, prese cu arbore cotit etc.)	0,45	0,65

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.1 (continuare)

Receptorul	k_c	cos φ
Motoarele electrice cu funcţionare intermitentă (macarale, funiculare, căi cu role, mese de ridicat etc.):		
— cu regim uşor	0,10	0,45
— cu regim greu	0,15	0,45
Aparate de încălzire, cuptoare cu rezistenţă, cuptoare de uscat, băi de săruri etc.	0,60	0,95
Transformatoare pentru sudare cu arc	0,37	0,35
Aparate de sudat cap la cap şi prin puncte, aparate cu încălzire directă	0,42	0,70
Convertizoare rotative de sudare cu un singur punct de lucru	0,51	0,65
Cuptoare de inducţie:		
— de joasă frecvenţă	0,72	0,95
— de înaltă frecvenţă	0,8	0,95
Cuptoare cu arc pentru topirea oţelului	0,7	0,85
b. Instalaţii de iluminat		
Pentru clădiri (încăperi) mici pînă la 200 m³	1,0	0,9 — fluorescent compensat; 1,0 — incandescent
Hale industriale		
— cu ateliere şi încăperi separate	0,85	
— fără separaţii	0,95	
Clădiri sociale şi administrative, şcoli, laboratoare	0,9	
Centrale şi staţii energetice	0,9	
Iluminat exterior (public)	0,9	
Iluminat de siguranţă	1,0	

Se adună separat puterile active şi reactive ale diferitelor categorii de receptoare (independent de schema electrică de alimentare), obţinîndu-se puterile cerute totale active P_{ct} şi reactive Q_{ct} care determină puterea aparentă cerută totală (pe atelier, secţie, întreprindere)

$$S_{ct} = \sqrt{P_{ct}^2 + Q_{ct}^2}, \tag{1.4}$$

şi factorul de putere natural corespunzător

$$\cos \varphi_t = \frac{P_{ct}}{S_{ct}}. \tag{1.5}$$

Calculele se grupează ca în tabela 1.2.

Tabela 1.2

Exemplu de calcul al puterii cerute, prin metoda coeficientului de cerere

Secțiile și grupele de receptoare	Puterea instalată P_i kW	Coeficientul de cerere k_c	Factorul de putere cos φ	Puterea activă P_c kW	Puterea reactivă Q_c kVAr
I. Mașini unelte					
Strunguri, freze, polizoare, mașini de găurit etc.	400	0,20	0,6	80	107
Strunguri automate, freze pentru roți dințate etc.	200	0,25	0,6	50	67
II. Turnătorie oțel					
Cuptoare de inducție de joasă frecvență	200	0,8	0,35	160	416
Ventilatoare și pompe	20	0,75	0,8	15	11
Pod rulant cu regim ușor	100	0,10	0,45	10	17
Total	920	0,338	0,45	315	618

Puterea aparentă cerută totală $S_{ct} = \sqrt{P_{ct}^2 + Q_{ct}^2} = \sqrt{315^2 + 618^2} = 691$ kVA;

Factorul de putere natural $\cos \varphi = \frac{P_{ct}}{S_{ct}} = \frac{315}{691} = 0{,}45$;

Coeficientul mediu de cerere $k_c = \frac{P_{ct}}{P_{it}} = \frac{315}{920} = 0{,}338.$

Observație. În situația în care se impune îmbunătățirea în cos φ (§ 1.6), S_{ct} se recalculează ținînd cont de reducerea puterii Q_{ct} cu valoarea puterii reactive a sursei de compensare.

1.3. INSTALAȚIILE ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE ALE ÎNTREPRINDERILOR INDUSTRIALE

Alimentarea întreprinderilor industriale se face din rețelele sistemului energetic, la tensiuni de 6—220 kV, avînd în vedere că puterile cerute de acești consumatori pot ajunge la valori de sute de megawați.

Instalațiile de înaltă tensiune ale unei întreprinderi industriale se compun din instalația de racordare la sistemul energetic și instalația de distribuție a energiei electrice la consumatorii de pe teritoriul întreprinderii.

1.3.1. Instalația de racordare la sistemul energetic

Instalația de racordare la sistemul energetic cuprinde liniile care alimentează stațiile de transformare coborîtoare, stațiile de distribuție (de conexiuni) sau posturile de transformare, de la barele stațiilor din sistemul energetic.

Scanned with OKEN Scanner

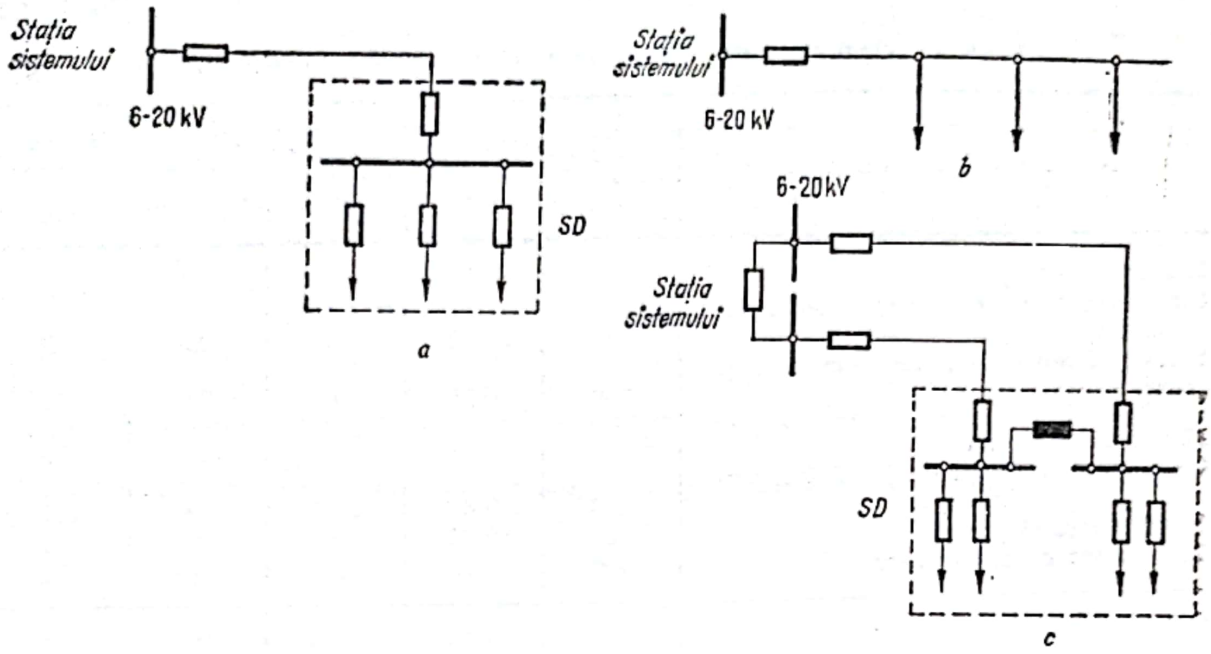


Fig. 1.1. Schemele instalaţiilor de racordare a unei întreprinderi industriale la sistemul energetic, la tensiunea de 6—20 kV:

a — cu o singură linie de alimentare şi staţie de distribuţie *SD*; *b* — cu o singură linie de alimentare fără staţie de distribuţie; *c* — cu două linii de alimentare şi staţie de distribuţie.

Schemele de alimentare la tensiuni de 6—20 kV sînt indicate în figura 1.1. Pentru alimentarea consumatorilor din categoria III şi uneori II se foloseşte o singură linie (fig. 1.1. *a* şi *b*); alimentarea consumatorilor din categoria I şi II necesită două linii (fig. 1.1. *c*).

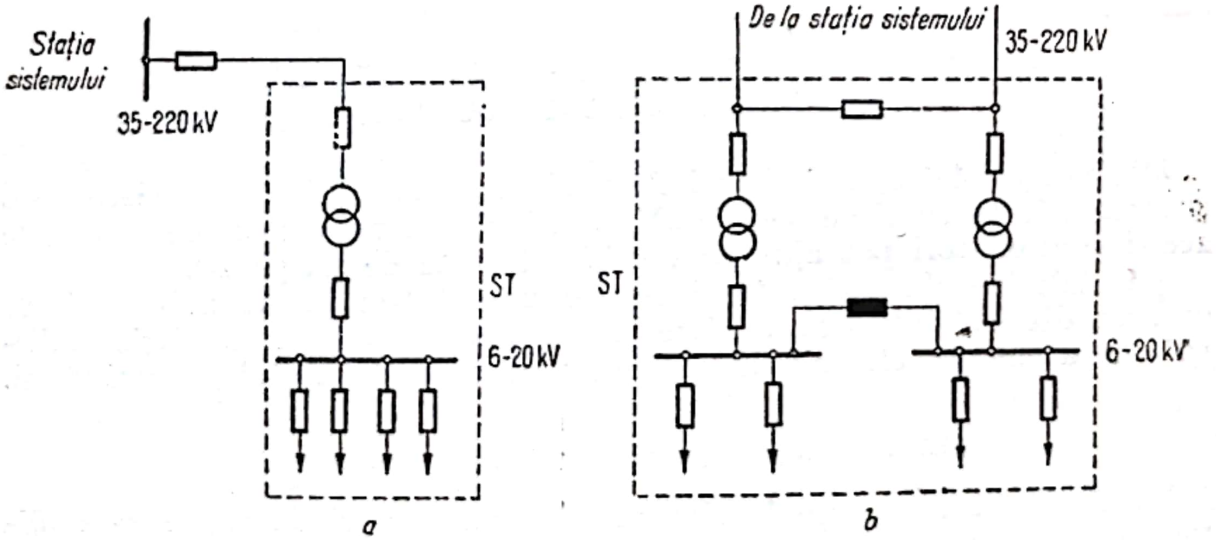


Fig. 1.2. Schemele instalaţiilor de racordare a unei întreprinderi industriale la sistemul energetic, la tensiunea de 35—220 kV, cu staţie de transformare *ST*:

a — consumatori de categoria II; *b* — consumatori de categoria I.

Scanned with OKEN Scanner

La tensiuni de 35—220 kV pot fi posibile următoarele soluţii: — pentru consumatorii din categoria III şi parţial II schema din figura 1.1, *b* reprezintă un sistem simplu şi avantajos din punct de vedere economic, deoarece înalta tensiune pătrunde pînă în centrul de greutate al consumatorilor (racord adînc), eliminînd o treaptă intermediară de tensiune [27]. Racordul adînc prezintă următoarele avantaje principale:

— mărirea siguranţei în alimentarea cu energie electrică;
— micşorarea curenţilor de lucru sau de scurtcircuit;
— simplificarea schemelor de comutaţie primară (se utilizează siguranţe fuzibile de înaltă tensiune);
— simplificarea reglajului tensiunii;
— elasticitatea în racordarea unor noi consumatori.

— pentru consumatorii din categoria II, schema din figura 1.2, *a*;

— pentru consumatorii din categoria I şi parţial II schema în H (fig. 1.2, *b*) este o schemă care prezintă elasticitate, permiţînd multe modificări şi posibilităţi de alimentare în caz de avarii.

1.3.2. Instalaţia de distribuţie în înaltă tensiune

Instalaţia de distribuţie a energiei electrice la consumatorii de pe teritoriul întreprinderii cuprinde liniile care alimentează posturile de transformare *PT* ale atelierelor sau secţiilor, de la barele staţiilor de transformare *ST* sau de distribuţie *SD* ale întreprinderii.

Schemele fundamentale de distribuţie în înaltă tensiune (6—20 kV) sînt cu:

— linii radiale care alimentează separat fiecare receptor de înaltă tensiune sau post de transformare (fig. 1.3.);

— linii principale (fideri), fiecare linie principală alimentînd mai multe receptoare sau posturi de transformare (fig. 1.4).

Avantajele schemelor cu linii radiale sînt:

— simplitatea din punct de vedere al execuţiei şi al exploatării;
— siguranţa alimentării cu energie în cazul avariilor;
— posibilitatea automatizării şi comenzii centralizate.

Dezavantajele acestor scheme sînt:

— consumul ridicat de materiale neferoase;
— investiţii importante la construirea reţelei.

Schemele de distribuţie cu linie principală nesecţionată (fig. 1.4 *a*)

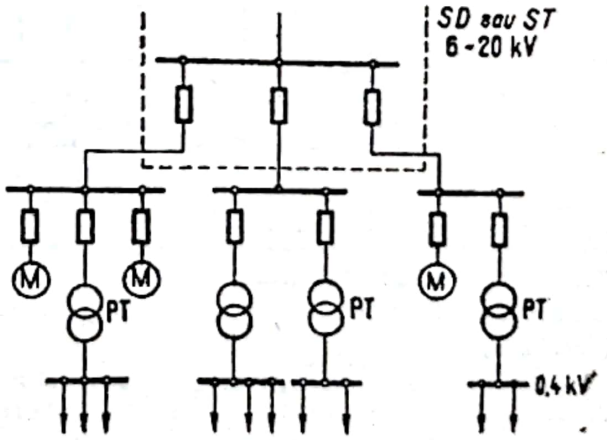


Fig. 1.3. Schema de distribuţie în înaltă tensiune cu linii radiale.

Scanned with OKEN Scanner

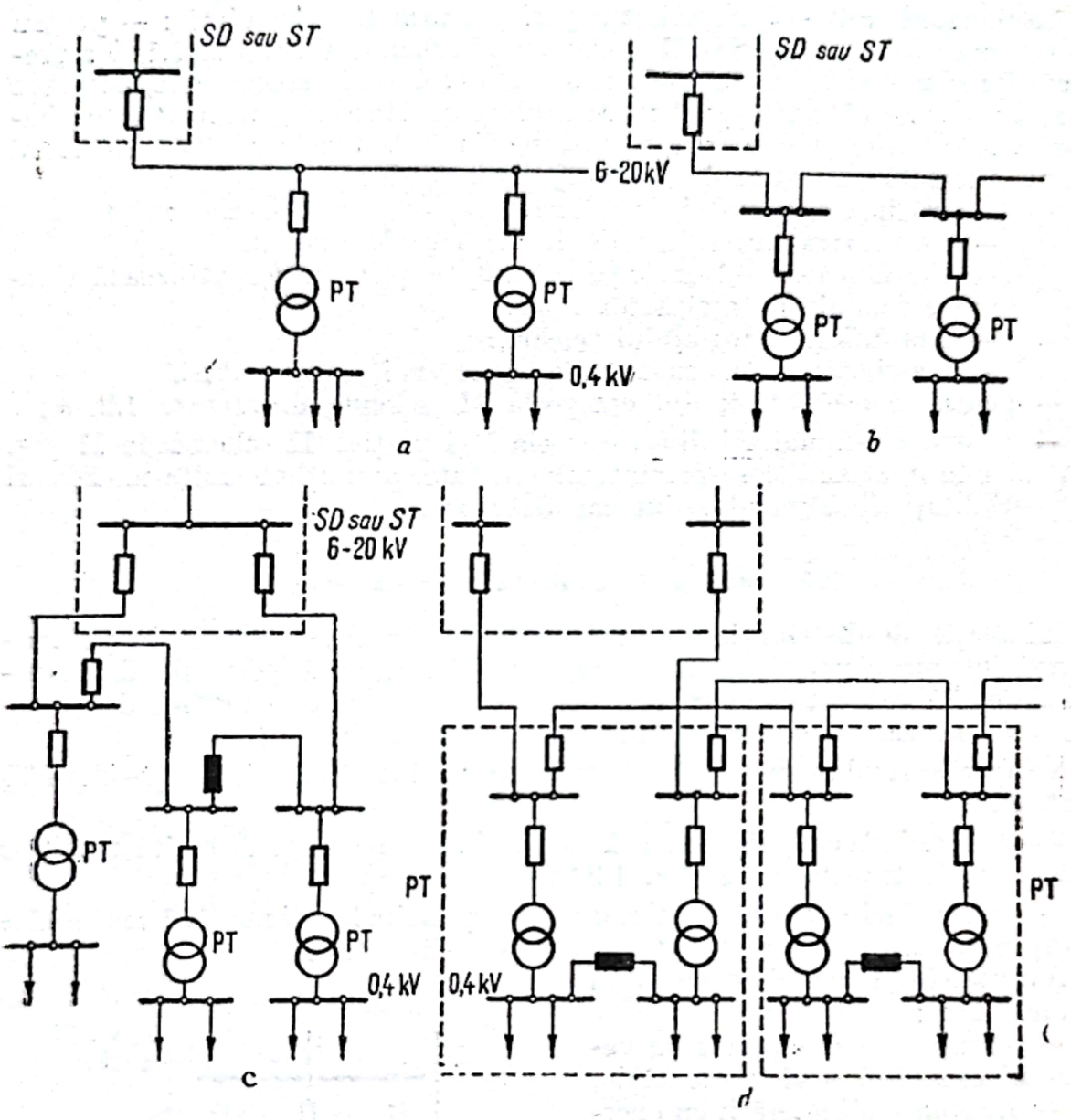


Fig. 1.4. Schema de distribuție în înaltă tensiune cu linie principală:
a — nesecționată; *b* — secționată; *c* — buclată; *d* — dublă.

sau secționată (fig. 1.4, *b*) sînt utilizate pentru alimentarea consumatorilor din categoria III; pentru consumatorii din categoria I și II se utilizează schemele cu linie principală buclată (fig. 1.4, *c*) sau cu linie principală dublă (fig. 1.4, *d*).

Schemele cu linii principale sînt recomandate pentru alimentarea unui număr mare de posturi de mică putere.

Avantajele acestor scheme sînt:

— investițiile mici la construirea rețelei;
— posibilitatea de realizare cu conductoare din bare.

Scanned with OKEN Scanner

Dezavantajele sînt:

— dificultăţi în utilizarea automatizării şi telecomenzii;

— siguranţă mai redusă în funcţionare (schemele din fig. 1.4, *a* şi *b*).

Lucrarea [26] indică domeniile de utilizare a diferitelor scheme de distribuţie în înaltă tensiune.

1.3.3. Posturi de transformare

Staţiile coborîtoare şi de distribuţie sînt identice cu cele ale sistemului energetic, ele fiind obiectul unui alt curs [21]. În cele ce urmează vor fi prezentate posturile de transformare. Posturile de transformare debitează la consumatori energia electrică la o tensiune între faze pînă la 1 kV inclusiv.

Din punct de vedere al amplasării se deosebesc:

— posturi prefabricate (fig. 1.5) instalate în interiorul atelierelor, în centrele de greutate ale sarcinilor;

— posturi integrate în corpul clădirilor atelierelor;

— posturi independente de clădirile întreprinderii (fig. 1.6 şi fig. 1.7).

Posturile prefabricate reprezintă o tendinţă actuală în alimentarea secţiilor unei întreprinderi datorită avantajelor pe care le au din punct de vedere tehnico-economic: eliminarea construcţiei de zidărie, montaj simplu şi rapid, reducerea lungimii reţelei de joasă tensiune, instalarea în centrele de greutate ale sarcinilor şi menţinerea constantă a tensiunii la şocuri de sarcină.

Echipamentul posturilor de transformare [6] se compune din:

1) Transformatorul de putere (TTU 100—630 kVA avînd de obicei conexiunea Dy_0 — 5, care permite un dezechilibru al sarcinii de aproximativ 30%; tensiunea secundară nominală este de $3\times380/220$ V cu posibilitate de reglaj de $\pm5\%$, în lipsa sarcinii.

2) Separatorul (STI) permite o separare vizibilă a circuitului faţă de bare, avînd rolul de a proteja personalul de exploatare; pentru a se evita manevrarea în prezenţa sarcinii, separatorul se blochează mecanic sau electric în raport cu întreruptorul circuitului respectiv.

3) Separatorul de sarcină (STIS) are în plus şi rolul de întreruptor pentru curenţii nominali ai circuitului, avînd puterea de rupere de circa 7 MVA; protecţia împotriva curenţilor de scurtcircuit sau suprasarcină este realizată cu siguranţe fuzibile de înaltă tensiune înseriate cu separatoarele.

4) Întreruptorul serveşte la conectarea şi deconectarea manuală sau automată a circuitelor electrice; întreruptoarele de înaltă tensiune utilizate în posturile de transformare sînt:

— cu ulei puţin IUP, acţionate prin dispozitive manuale DMI, electromagnetice DSI, cu aer comprimat DPI, cu resoarte DRI;

Scanned with OKEN Scanner

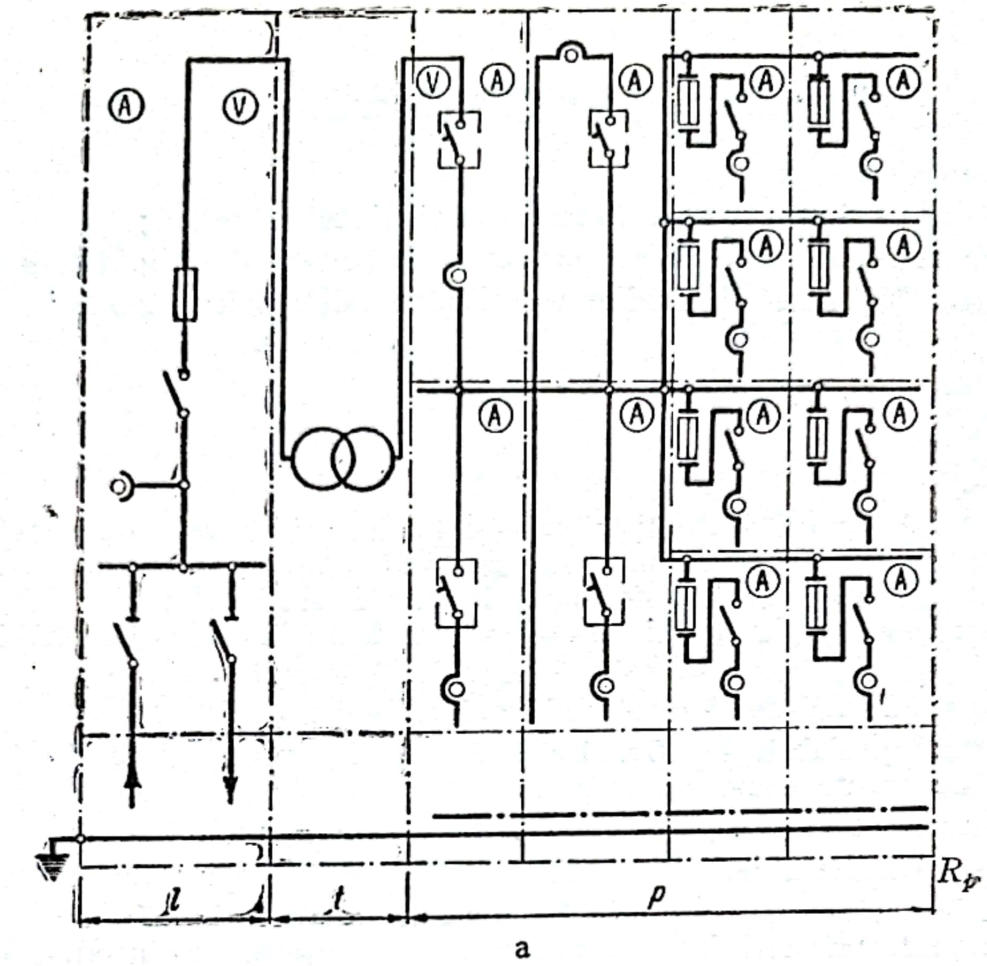


Fig. 1.5. Post de transformare în cabină metalică prefabricată:
a — schema electrică; *b* — realizarea constructivă; *l* — celula de înaltă tensiune; *t* — celula transformatorului; *p* — tabloul de distribuție de joasă tensiune tip sertarobloc; *o* — conductorul neutru; R_p — centura de legare la pământ de protecție.

Scanned with OKEN Scanner

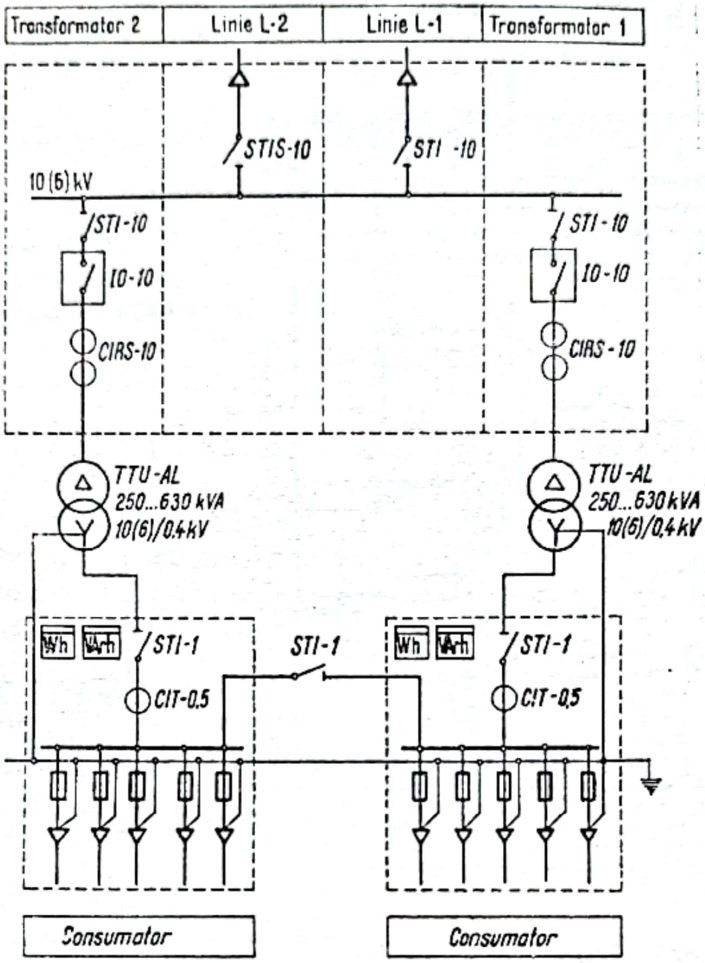


Fig. 1.6. Schema electrică a postului de transformare cu două transformatoare.

— cu ortoejector IO, acţionate prin dispozitivul cu servomotor şi resoarte MR.

Puterile de rupere ale acestor întreruptoare sînt în limitele 100—500 MVA.

5) Siguranţele fuzibile de înaltă tensiune (SFI) pot înlocui întreruptorul în reţelele cu puteri de scurtcircuit pînă la 400 MVA.

6) Barele colectoare se confecţionează din cupru sau aluminiu de secţiune dreptunghiulară sau circulară, montate pe izolatoare suport.

7) Celule prefabricate de înaltă tensiune pentru transformator şi pentru linie, în diferite variante de echipare.

8) Tablouri de joasă tensiune prevăzute cu separator, întreruptor automat sau siguranţe la transformator şi siguranţe la plecările spre consumatori.

Protecţia transformatoarelor contra defectelor interne este realizată cu ajutorul releelor de gaze (Buchholz), contra suprasarcinilor prin relee de temperatură montate pe transformator şi contra scurtcircuitelor exter-

Scanned with OKEN Scanner

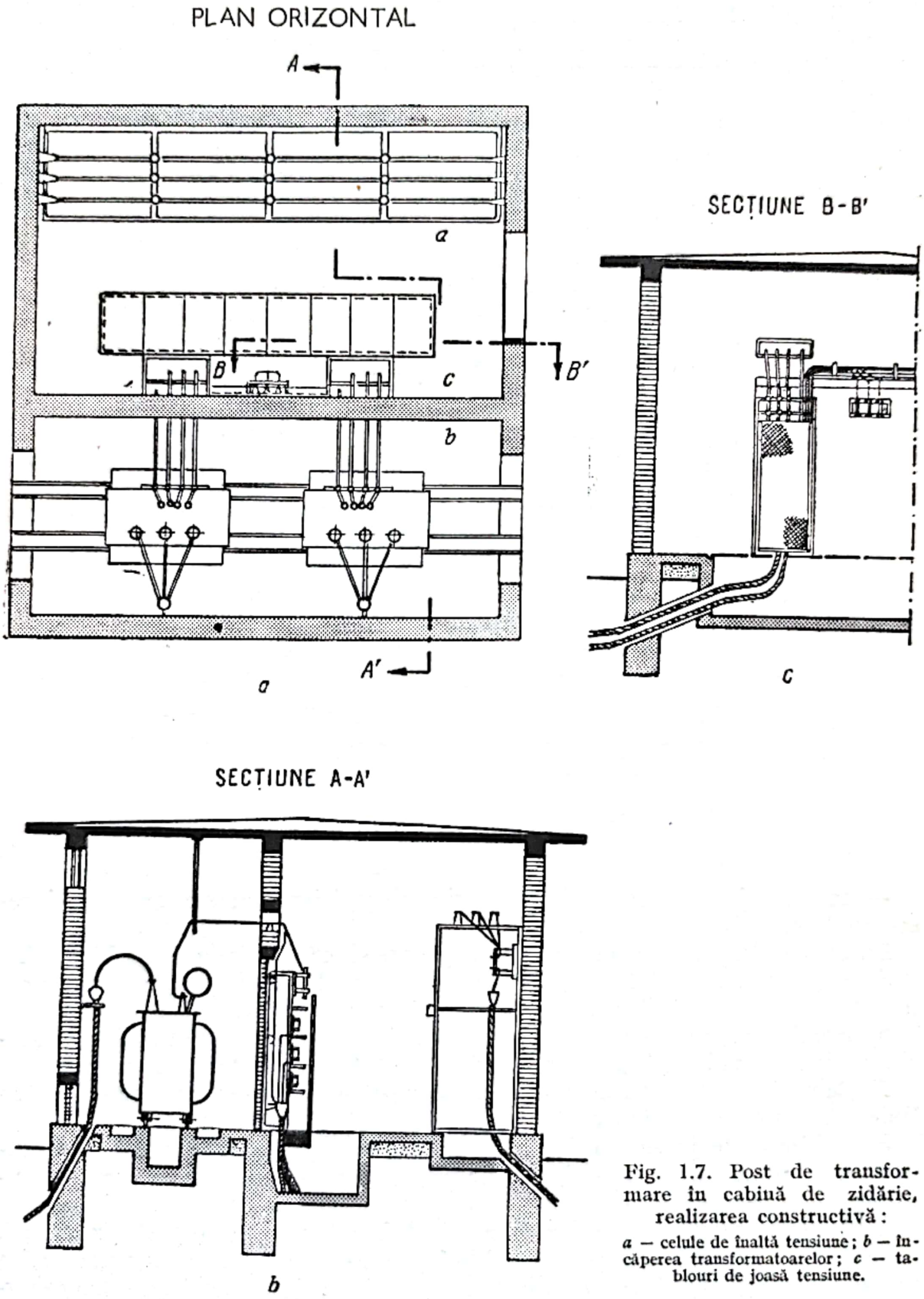


Fig. 1.7. Post de transformare în cabină de zidărie, realizarea constructivă:
a — celule de înaltă tensiune; *b* — încăperea transformatoarelor; *c* — tablouri de joasă tensiune.

Scanned with OKEN Scanner

ne prin siguranţe fuzibile sau întreruptoare automate prevăzute cu relee maximale temporizate.

Întreruptoarele de înaltă tensiune pot avea:

1) Relee primare directe (de exemplu WIp), înfăşurările releelor fiind parcurse de curentul primar al transformatorului (fig. 1.8, *a*);

2) Relee secundare cu curent operativ alternativ, alimentate din înfăşurările secundare ale transformatoarelor de măsură de curent şi de tensiune; utilizarea lor impune unele modificări constructive ale dispozitivelor de acţionare.

În cele ce urmează vor fi analizate cîteva sisteme de protecţie cu curent operativ alternativ.

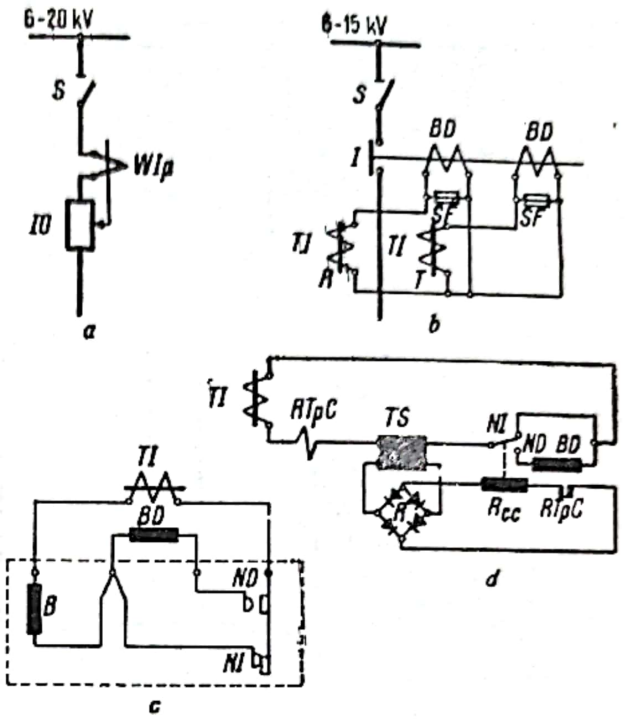


Fig. 1.8. Sisteme de protecţie cu curent operativ alternativ:

a — prin releu primar direct; *b* — prin bobine de declanşare şuntate prin siguranţe fuzibile; *c* — prin dispozitiv de protecţie în curent operativ alternativ DPCA; *d* — prin releu intermediar pentru curent operativ alternativ RICA—1.

Bobinele de declanşare *BD* ale dispozitivului de acţionare pot fi alimentate direct de la transformatoarele de curent *TI* (fig. 1.8, *b*), siguranţele fuzibile *SF* fiind special calibrate pentru a asigura funcţionarea selectivă a protecţiei. Dezavantajul acestei scheme constă în necesitatea înlocuirii fuzibilelor după fiecare declanşare a întreruptorului.

Prin utilizarea dispozitivului de protecţie în curent operativ alternativ DPCA (fig. 1.8, *c*) s-a înlocuit siguranţa fuzibilă prin contactele *ND* (normal deschis) şi *NI* (normal închis) ale dispozitivului.

La apariţia curentului de avarie, curentul din secundarul transformatorului *TI*, trecînd prin bobina *B* a releului şi prin contactul *NI*, determină închiderea contactului *ND* şi apoi deschiderea contactului *NI*; în acest mod bobina de declanşare *BD* a dispozitivului de acţionare este alimentată şi asigură deconectarea întreruptorului. Pentru protecţia transformatorului sînt necesare două asemenea dispozitive montate pe cîte două faze. Dezavantajul acestui releu îl constituie necesitatea verificării şi înlocuirii contactelor *ND* şi *NI*, care se uzează destul de rapid.

Un alt aparat de protecţie este releul intermediar pentru curent operativ alternativ RICA —1 (fig. 1.8, *d*); curentul din secundarul transformatorului de curent *TI* străbate înfăşurarea primară a transformatorului cu saturaţie rapidă *TS*, a cărui tensiune secundară are o valoare limitată în cazul supra-

Scanned with OKEN Scanner

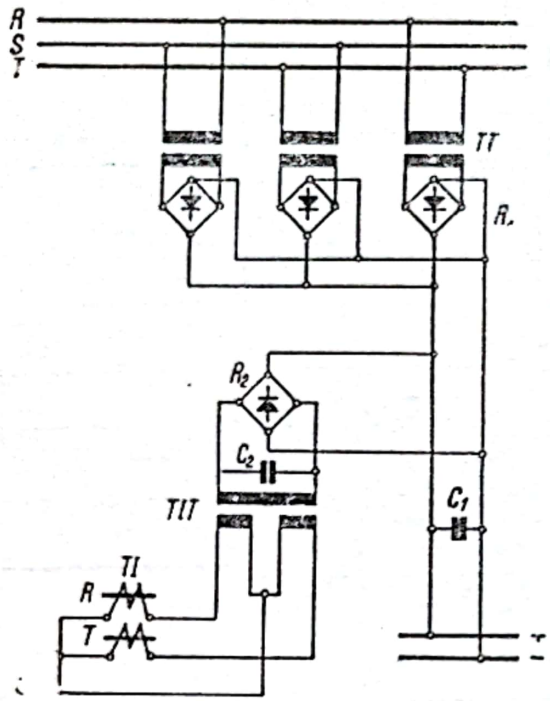
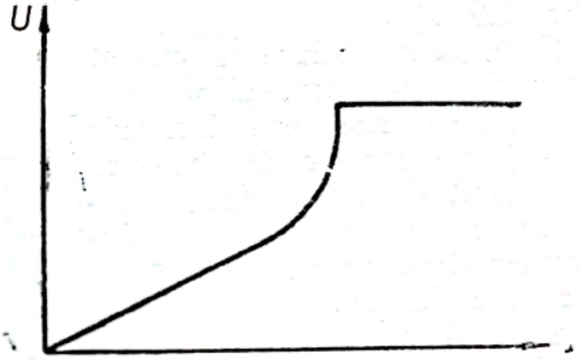


Fig.1.9. Bloc de alimentare în curent continuu BACC.

Fig. 1.10. Caracteristica tensiune — curent a circuitului ferorezonant TIT—C_2 din fig. 1.9.



curenților, datorită saturației rapide a transformatorului. În cazul unul scurtcircuit, releul de curent cu temporizare *RTpC* își închide contactul ce asigură alimentarea releului de curent continuu R_{cc} prin redresorul R; releul R_{cc} închide contactul *ND* și apoi deschide contactul *NI*, determinînd alimentarea bobinei *BD* și declanșarea întreruptorului.

La varianta RICA—2 a acestui releu, transformatorul *TS* și redresorul *R* au fost înlocuite printr-un bloc de alimentare în curent continuu *BACC*, a cărui schemă electrică este redată în figura 1.9. Curentul continuu se obține de la redresoarele R_1 alimentate prin transformatoarele de tensiune *TT* și de la redresorul R_2 alimentat prin transformatorul de curent — tensiune *TIT*, a cărui înfășurare primară este parcursă de curenții transformatoarelor de curent *TI*; C_1 este un condensator de filtrare. Înfășurarea transformatorului *TIT*, împreună cu condensatorul C_2 constituie un circuit ferorezonant care stabilizează tensiunea, în cazul apariției curentului de scurcircuit (fig. 1.10).

Această sursă de curent continuu permite utilizarea în schemele de protecție a releelor de timp, a releelor intermediare de curent continuu, a releelor de gaze, a protecției maximale în două trepte etc.

Alegerea numărului, a locului de amplasare și a puterii posturilor de transformare ale întreprinderii (secției) se face în următoarea succesiune:

— pe planul de situație al întreprinderii sau secției se trec puterile aparente cerute S_c (§ 1.2) ale diferitelor secții sau a consumatorilor din secție;

— se determină centrele de greutate ale grupelor de sarcini;

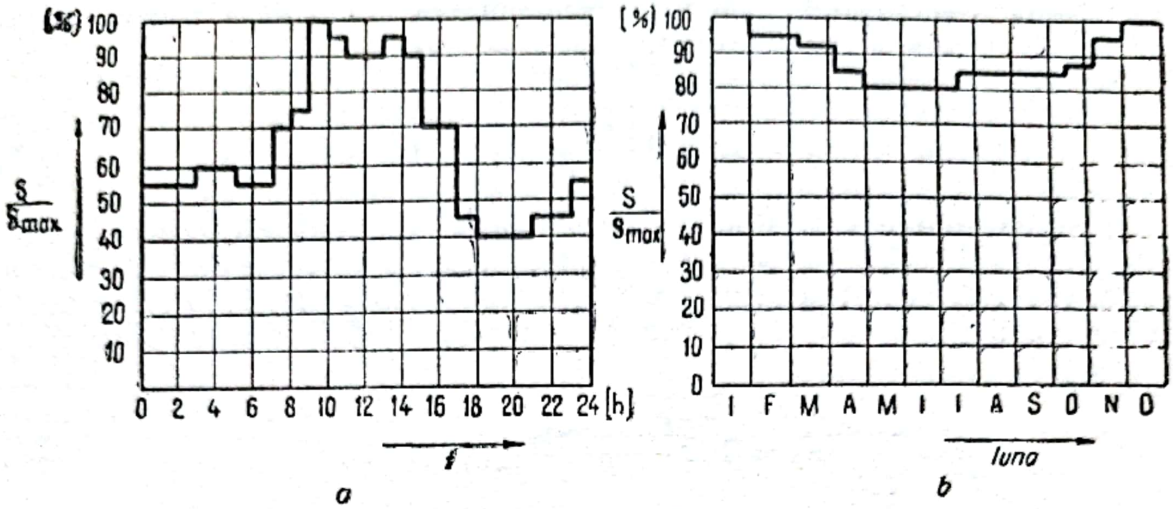


Fig. 1.11. Curbele de sarcină ale unei întreprinderi:
a — curba de sarcină zilnică (iarna); *b* — curba de sarcină anuală.

— se marchează provizoriu locurile de amplasare a posturilor de transformare şi se distribuie sarcinile între posturi, avîndu-se în vedere ca puterea unui post să nu depăşească circa 1 000 kVA.

Pentru determinarea puterii transformatoarelor din postul de transformare este necesar să se cunoască curba de sarcină zilnică (fig. 1.11, *a*) pentru ziua de lucru în perioada cea mai încărcată (iarna), curba de sarcină anuală (fig. 1.11, *b*) şi puterea totală cerută de întreprindere sau secţie la barele de 0,4 kV ale postului de transformare, reprezentînd puterea maximă cerută de întreprindere în zilele lunilor de iarnă (decembrie, ianuarie).

Curbele de sarcină sînt specifice profilului industrial al întreprinderii [29].

Pentru curba de sarcină zilnică (fig. 1.11, *a*) se defineşte coeficientul de utilizare (umplere) a curbei

$$K_u = \frac{S_{med}}{S_{max}} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T S\,dt}{S_{max}} = \frac{A}{TS_{max}}, \qquad (1.6)$$

în care: S_{med} este valoarea medie a puterii cerute de întreprindere pentru perioada de timp $T = 24$ ore;

coordonate.

S_{max} — valoarea maximă a puterii cerute;

A — suprafaţa cuprinsă între curba de sarcină zilnică şi axele de

Pentru a evita subîncărcarea transformatoarelor alese după puterea maximă cerută se va ţine cont de:

a. Suprasarcinile admisibile ale transformatoarelor pe baza variaţiilor zilnice ale sarcinii, stabilite prin regula celor trei procente — pentru fiecare 10 procente de reducere a coeficientului de utilizare K_u faţă de 100%

Scanned with OKEN Scanner

se admite o suprasarcină de 3% peste puterea nominală a transformatorului, pe durata supraîncărcării.

Se obține

$$\alpha_3 = 3\,\frac{100 - K_u\%}{10}\ [\%]. \tag{1.7}$$

b. Suprasarcinile admisibile pe baza variațiilor anuale ale sarcinii, stabilite prin regula celor p procente — pentru fiecare p procente de subîncărcare vara, raportat la puterea nominală S_n a transformatoarelor, iarna se poate admite o suprasarcină de p procente, care să nu depășească însă 15%.

Deci

$$\alpha_p = 100\,\frac{S_n - S_{max_v}}{S_n}\ [\%] \leqslant 15\%, \tag{1.8}$$

unde S_{max_v} este puterea maximă cerută de întreprindere în lunile de vară, conform graficului anual.

Capacitatea de suprasarcină totală, datorită neuniformităților curbelor zilnice și anuale de sarcină va fi:

$$\alpha = \alpha_3 + \alpha_p \tag{1.9}$$

și nu trebuie să depășească 20% pentru transformatoare instalate în interior și 30% pentru transformatoare instalate în exterior.

Puterea S_n a transformatoarelor se alege astfel încît, ținînd cont de suprasarcina totală admisă, să se asigure puterea maximă cerută de întreprindere S_{max_i} (iarna):

$$S_{max_i} \leqslant S_n + \alpha S_n \tag{1.10}$$

adică

$$S_n \geqslant \frac{S_{max_i}}{1+\alpha} = \frac{S_{max_i}}{1+\alpha_3+\alpha_p}.$$

Înlocuind pe α_3 și α_p cu valorile din relațiile (1.7) și (1.8), obținem

$$S_n \geqslant \frac{S_{max_i} + S_{max_v}}{2 + \frac{3}{10}(1 - K_u)}. \tag{1.11}$$

Relațiile sînt stabilite pentru o temperatură maximă a mediului ambiant de 35°C și minimă de —25°C, ceea ce impune ventilarea naturală sau forțată a posturilor de transformare.

În tabela 1.3 se dă un exemplu de determinare a puterii transformatorului pe baza curbelor de sarcină din figura 1.11 pentru secția indicată în tabela 1.2; puterea maximă cerută iarna S_{max_i} este egală cu puterea cerută de întreprindere.

Tabela 1.3

Exemplu de determinare a puterii transformatorului pe baza curbelor de sarcină

Mărimea		Relația	Calculul
Puterea aparentă cerută (maximul de iarnă) $S_{ct} = S_{max\,i}$		Tabela 1.2	691 kVA
Puterea aparentă maximă vara $S_{max\,v}$		Fig. 1.11b $0{,}85\ S_{max\,i}$	$0{,}85 \cdot 691 = 587{,}3$ kVA
Coeficientul de utilizare K_u		(1.6)	64,2%
Puterea aparentă a transformatorului S_n	calculată	(1.11)	$\frac{691 + 587{,}3}{2 + \frac{3}{10}(1 - 0,\ 642)} = 608{,}7$ kVA
	adoptată	[6]	630 kVA
Suprasarcinile	α_3	(1.7)	$3\frac{100 - 64{,}2}{10} = 10{,}7\%$
	α_p	(1.8)	$100\frac{630 - 587{,}3}{630} = 6{,}8\%$
	α	(1.9)	$10{,}7 + 6{,}8 = 17{,}5\%$

Determinarea numărului de transformatoare dintr-un post de transformare se face pe baza asigurării continuității în alimentarea cu energie electrică a consumatorilor. Astfel:

— dacă puterea consumatorilor din categoria I depășește 50% din sarcina totală a postului de transformare se recomandă utilizarea a două transformatoare, fiecare avînd puterea egală cu sarcina totală;

— dacă puterea consumatorilor din categoria I nu depășește 50%, se recomandă utilizarea a două transformatoare avînd suma puterilor egală cu sarcina totală, puterea fiecăruia fiind egală cel puțin cu puterea consumatorilor de categoria I;

— pentru consumatorii de categoria II și III transformatoarele vor avea puterea egală cu sarcina cerută.

Asigurarea regimului economic optim de funcționare în paralel a mai multor transformatoare dintr-un post, se obține pe baza verificării puterii transformatoarelor la cheltuielile minime de exploatare, corespunzătoare pierderilor minime de putere [29].

Scanned with OKEN Scanner

1.4. INSTALAŢII ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

Sistemul de distribuţie cel mai mult utilizat pentru instalaţiile la consumator este cel trifazat, cu sau fără conductor neutru, la frecvenţa de 50 Hz. Tensiunea de 380/220 V este cea mai des adoptată şi prezintă faţă de tensiunea de 500 V avantajul că permite alimentarea receptoarelor de forţă şi de iluminat de la un transformator comun.

1.4.1. Schemele instalaţiilor electrice de joasă tensiune

Instalaţiile electrice de joasă tensiune cuprind:

— reţele electrice compuse din fideri, coloane (linii principale, magistrale) şi circuite (derivaţii);

— puncte de alimentare şi distribuţie, adică posturi de transformare şi tablouri de distribuţie.

Reţelele electrice de joasă tensiune se proiectează ca scheme radiale (fig. 1.12) sau cu linii principale (fig. 1.13) avînd avantajele şi dezavantajele menţionate în § 1.3.2.

În prezent, pentru a se reduce pierderile de energie şi tensiune, reţelele industriale de forţă se execută după schema bloc transformator- linie prin-

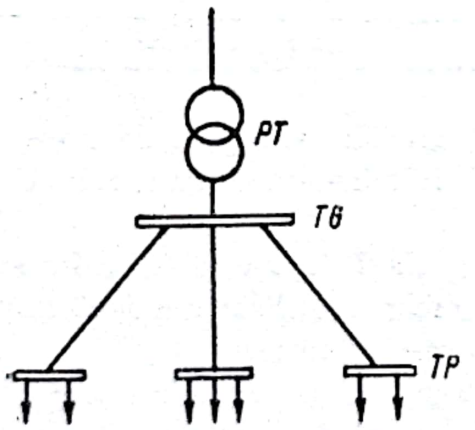


Fig. 1.12. Schema radială de distribuţie în joasă tensiune:
PT — post de transformare; *TG* — tablou general de distribuţie; *TP* — tablou principal de distribuţie.

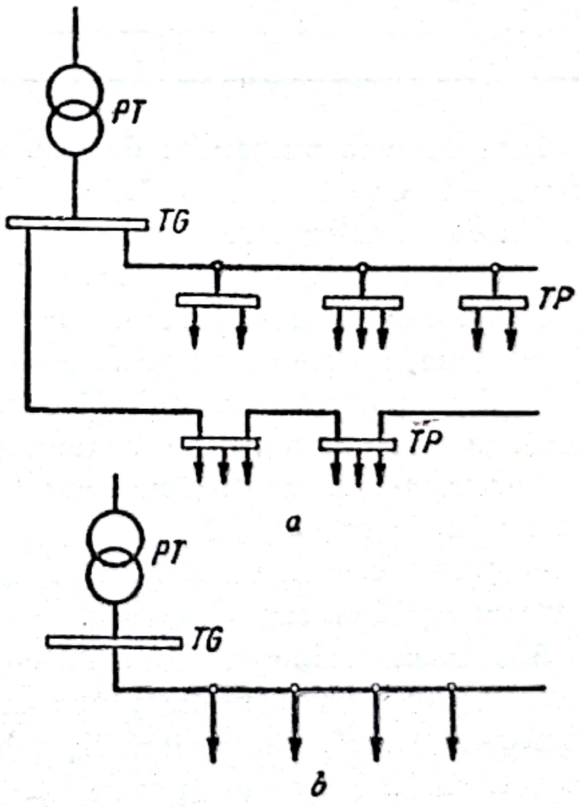


Fig. 1.13. Schema cu linii principale de distribuţie în joasă tensiune:
a — pentru sarcini concentrate (linie principală nesecţionată şi secţionată); *b* — pentru sarcini distribuite.

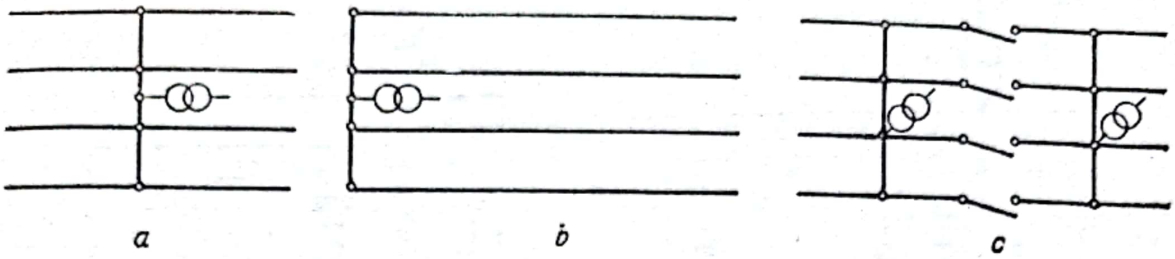


Fig. 1.14. Schema bloc transformator — linie principală din bare capsulate:
a — cu un transformator central; *b* — cu un transformator instalat la capătul secţiei; *c* — cu două transformatoare şi bare secţionate.

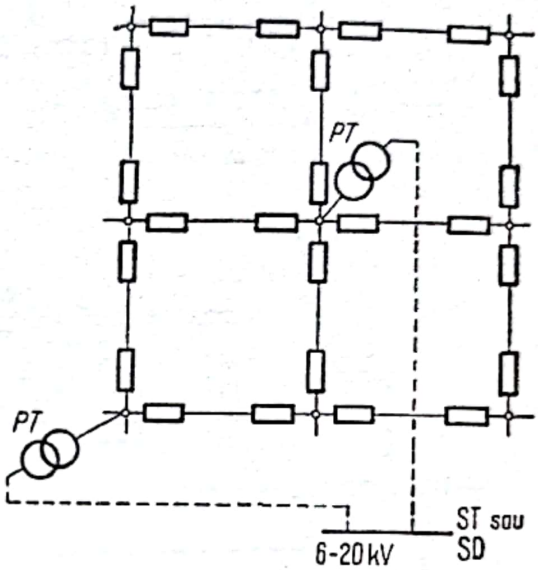


Fig. 1.15. Schema buclată de tip plasă.

cipală din bare capsulate (fig. 1.14) şi după schema buclată de tip plasă (fig. 1.15). Siguranţa în exploatare a reţelei buclate de tip plasă depinde de modul de amplasare a elementelor de protecţie. Fiecare nod poate fi prevăzut cu siguranţe fuzibile care trebuie să asigure o protecţie selectivă. În cazul unui defect pe un circuit, curentul care trece prin siguranţa acestuia este mult mai mare decît curenţii care trec prin celelalte siguranţe din nodul respectiv (fig. 1.16).

Alegerea definitivă a tipului de schemă se va face pe baza analizei tehnico-economice a variantelor posibile, urmărind realizarea unor investiţii minime şi a unor pierderi minime de energie electrică.

Instalaţiile electrice pentru iluminat pot fi pentru:

1) Iluminatul normal (de lucru), care asigură condiţiile necesare pentru des-

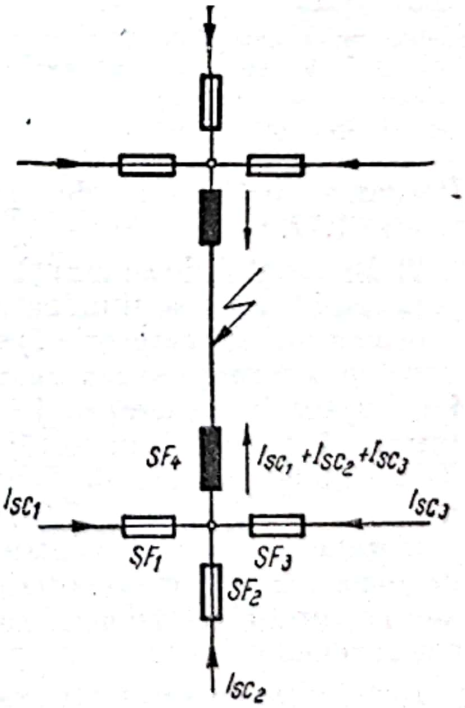


Fig. 1.16. Circulaţia curenţilor în cazul unui scurtcircuit într-o reţea de tip plasă.

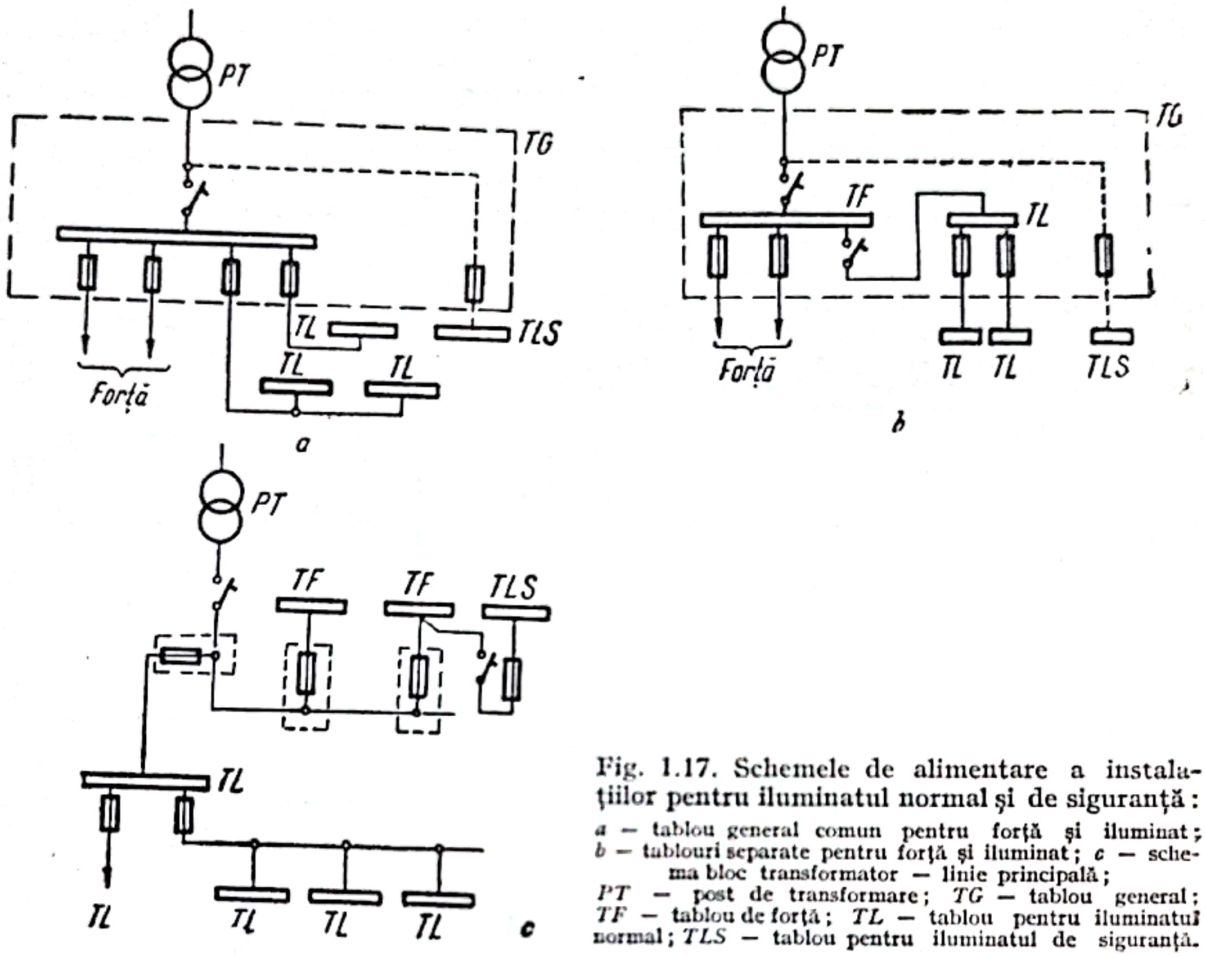


Fig. 1.17. Schemele de alimentare a instalațiilor pentru iluminatul normal și de siguranță:
a — tablou general comun pentru forță și iluminat; *b* — tablouri separate pentru forță și iluminat; *c* — schema bloc transformator — linie principală;
PT — post de transformare; *TG* — tablou general; *TF* — tablou de forță; *TL* — tablou pentru iluminatul normal; *TLS* — tablou pentru iluminatul de siguranță.

fășurarea activității de producție; schemele uzuale sînt date în figura 1.17.

2) Iluminatul de siguranță (de rezervă), care se folosește în cazul întreruperii accidentale a iluminatului normal, pentru continuarea lucrului (la consumatorii de categoria I) sau pentru evacuare. Instalația pentru iluminatul de siguranță se realizează ca o rețea separată și se racordează înaintea întreruptorului general de joasă tensiune sau înaintea întreruptorului de la intrarea în tablourile de forță; se prevede în plus și alimentarea de la o baterie de acumulatoare sau de la un grup electrogen, în caz de avarie a sursei normale de alimentare [22].

Instalațiile electrice pentru iluminatul exterior (căi de acces, platforme de lucru, incinta întreprinderii) se alimentează de la barele de joasă tensiune ale posturilor de transformare, comanda de aprindere putînd fi manulă sau automată.

Instalațiile de automatizare, măsură și comandă se alimentează printr-un circuit separat, eventual prin intermediul transformatoarelor de separație.

Scanned with OKEN Scanner

1.4.2. Materiale şi aparate utilizate în instalaţiile electrice

Alegerea materialelor şi aparatelor pentru executarea instalaţiei electrice la consumator se va face ţinînd seama de clasificarea încăperilor în funcţie de caracteristicile mediului ambiant (tab. 1.4), de pericolul de incendiu şi de electrocutare.

a. **Conducte electrice.** Materialele conductoare utilizate în instalaţiile electrice de joasă tensiune sînt cuprul, aluminiul, oţelul sau oţel-aluminiul; cuprul se va folosi numai în cazurile speciale prevăzute în lucrarea [30]. Secţiunile normalizate sînt 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400 mm². Pînă la secţiunea de 16 mm² se fabrică conductoare unifilare, iar pentru secţiuni mai mari, multifilare.

Conductele electrice se clasifică după domeniul de utilizare în: conducte neizolate, conducte izolate pentru transportul energiei electrice (cabluri de energie), conducte pentru instalaţii fixe, conducte pentru instalaţii

Tabela 1.4

Clasificarea încăperilor în funcţie de mediul ambiant [30]

Simbolul categoriei	Caracteristica principală a mediului	Tipuri
U_0	uscat	birouri, magazine, camere de locuit, încăperi industriale uscate
U_1	umed cu intermitenţă	bucătării, călcătorii, uscătorii, terase acoperite
U_2	umed	săli de pompe, încăperi industriale umede
U_3	ud	băi, spălătorii industriale, camere frigorifice
P	cu degajări de praf incombustibil	depunerile de praf afectează instalaţia electrică
K	corosiv	băi galvanice, încăperi pentru acumulatoare, grajduri
T	cu temperaturi ridicate	temperatura aerului ambiant depăşeşte +(35 ... 40) °C
CE	bun conducător	
EE	special pentru echipamente electrice	camere destinate pentru transformatoare, redresoare, etc.

Scanned with OKEN Scanner

mobile (servesc pentru racordarea receptoarelor mobile), conducte cu destinaţie specială (pentru exploatări miniere şi petroliere), conducte pentru autovehicule, conducte pentru instalaţiile de comandă, măsură, semnalizare, protecţie şi automatizare (circuite secundare).

Caracteristicile, domeniile de utilizare şi condiţiile tehnice ale conductelor electrice sînt analizate pe larg în lucrarea [11], iar intensităţile maxime admisibile în regim permanent sînt date în lucrarea [30].

Conductele neizolate se utilizează la liniile electrice aeriene, la reţelele şi tablourile de distribuţie ale întreprinderilor, sub formă de bare. Valorile maxime ale curenţilor în regim permanent sînt indicate în tabela 1.5. Barele se pot monta în execuţie deschisă la înălţimi inaccesibile (de exemplu pentru alimentarea podurilor rulante), în execuţie acoperită — în canale sub pardoseli şi în execuţie capsulată — în cutii din tablă de oţel.

Tabela 1.5

Intensităţile maxime admisibile ale curenţilor în regim permanent pentru bare de cupru şi aluminiu cu secţiune dreptunghiulară, montate pe muchie, vopsite, la temperatura mediului ambiant de +25°C [30]

Dimensiunile, mm		Intensităţile curenţilor, A							
		Cupru				*Aluminiu*			
		Curent alternativ		Curent continuu		Curent alternativ		Curent continuu	
Lăţimea	Grosimea	*Numărul barelor pe pol sau fază*							
		1	2	1	2	1	2	1	2
20	3	290	500	295	515	225	390	230	400
20	5	385	660	390	670	300	505	310	530
30	5	530	920	540	945	415	720	435	740
40	5	710	1180	715	1215	530	920	555	955
50	5	850	1410	870	1500	645	1115	680	1175
60	5	1000	1685	1025	1770	770	1335	805	1390
60	10	1415	2475	1475	2595	1105	1930	1150	2005
80	10	1840	2950	1970	3305	1435	2460	1495	2645
100	10	2215	3655	2360	4245	1750	2930	1815	3220

Obs. — Numărul barelor pe pol şi fază poate ajunge la 4.
— În cazul montării barelor pe lat, intensităţile maxime admisibile vor fi reduse cu 5% pînă la lăţimea de 60 mm şi cu 8% pentru lăţimi mai mari.

Utilizarea barelor capsulate prefabricate permite industrializarea lucrărilor de montaj, măreşte siguranţa în alimentarea cu energie electrică şi asigură extinderea sau modificarea uşoară a reţelei de distribuţie.

Scanned with OKEN Scanner

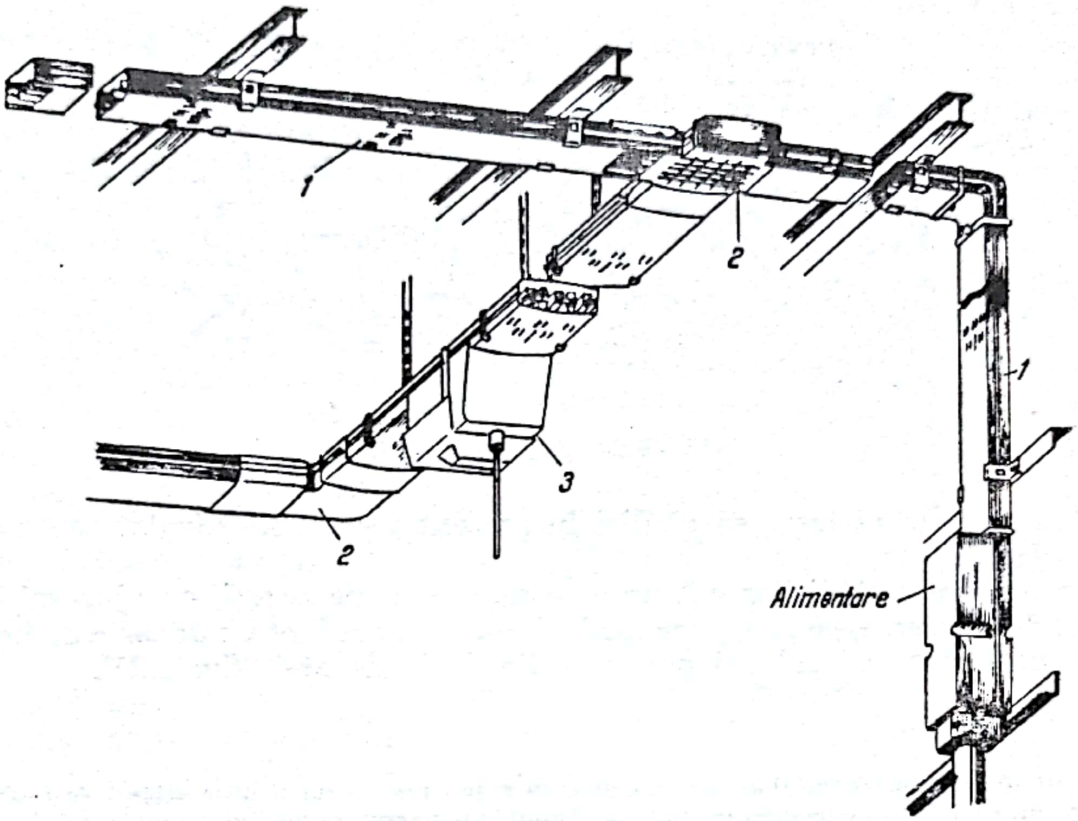


Fig. 1.18. Instalație electrică de distribuție cu bare capsulate:
1 — tronsoane de bare; *2* — cutii de derivație; *3* — derivație la receptor.

Instalația cu bare capsulate (fig. 1.18) se compune din tronsoane de bare magistrale și de derivație, cutii universale pentru îmbinări, derivații și cutii de siguranțe care permit racordarea receptoarelor (fig. 1.19).

Cablurile de energie reprezintă soluția cea mai sigură, dar și cea mai costisitoare în executarea instalațiilor electrice. Conductoarele cablului *C* din cupru sau aluminiu *A* sînt izolate fiecare cu cauciuc, hîrtie impregnată *H* sau material plastic *Y*; toate conductoarele cablului au o manta comună din plumb *P*, aluminiu sau material plastic *Y*, o armătură protectoare din benzi de oțel *B* și o împletitură textilă impregnată *I* (fig. 1.20). Valorile încărcărilor maxime în regim permanent sînt date în tabela 1.6.

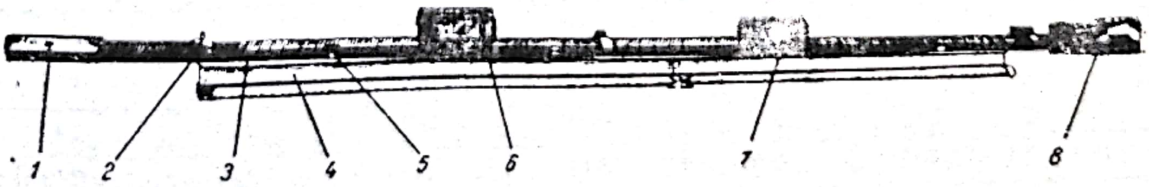


Fig. 1.19. Tronson de bare capsulate:
1 — cutie de alimentare; *1* — brățară de fixare; *3, 4, 5* — elemente pentru susținerea corpurilor de iluminat; *6, 7* — cutii de siguranțe; *8* — cutie de derivație.

Scanned with OKEN Scanner

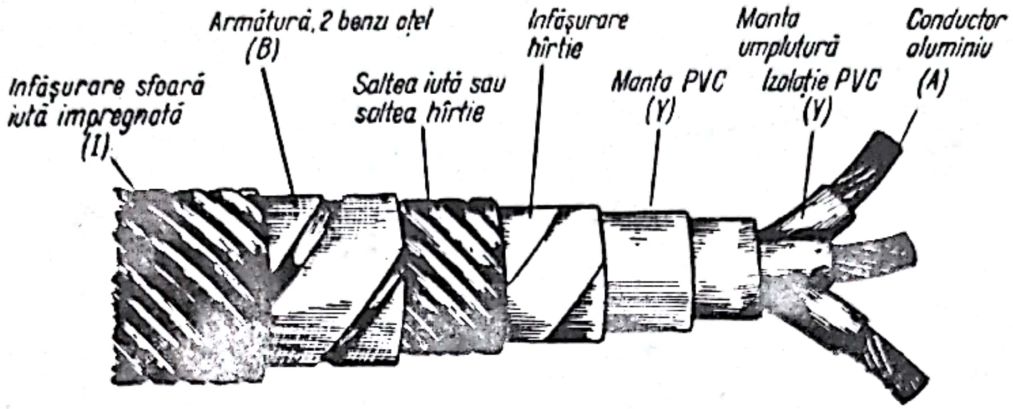


Fig. 1.20. Cablu ACYYBI.

Se menționează larga răspîndire în prezent a cablurilor izolate cu material plastic.

În interiorul clădirilor cablurile se montează pe pereți, cu ajutorul bridelor de susținere, pe stelaje, pe poduri din tablă profilată, în canale de beton sau suspendate pe cabluri portante din funie de oțel (fig. 1.21).

Tabela 1.6

Intensitățile maxime admisibile ale curenților în regim permanent pentru cabluri de cupru și aluminiu, cu 3—4 conductoare, montate în pămînt la temperatura mediului ambiant de + 20°C [30]

Secțiunea conductoarelor, mm²	*Intensitățile curenților, A*					
	izolație: cauciuc, PVC manta: cauciuc, PVC		izolație: cauciuc, PVC manta: plumb		izolație: hîrtie manta: plumb, aluminiu	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
4	45	36	45	35	45	35
6	60	48	57	43	60	45
10	80	64	77	60	80	65
16	110	88	102	81	110	90
25	135	110	131	102	135	110
35	165	130	168	131	165	130
50	200	160	206	156	200	160
70	245	195	250	193	245	195
95	295	235	300	230	295	235
120	340	270	344	269	340	270
150	390	310	395	306	390	310
185	445	355	450	350	445	355

Scanned with OKEN Scanner

Cablurile montate în exteriorul clădirilor se introduc în şanţuri săpate în pământ şi se protejează prin cărămizi (fig. 1.21, *e*), ţevi de oţel sau de beton.

Conductele pentru instalaţii fixe F din cupru sau aluminiu *A*, sînt izolate cu cauciuc şi împletitură textilă impregnată sau materiale plastice *Y*; aceste conducte sînt utilizate în instalaţiile electrice interioare de lumină şi forţă, fiind introduse în tuburi izolante şi de protecţie, pentru a fi ferite de lovituri şi de influenţa mediului ambiant.

Încărcările maxime în regim permanent sînt date în tabela 1.7.

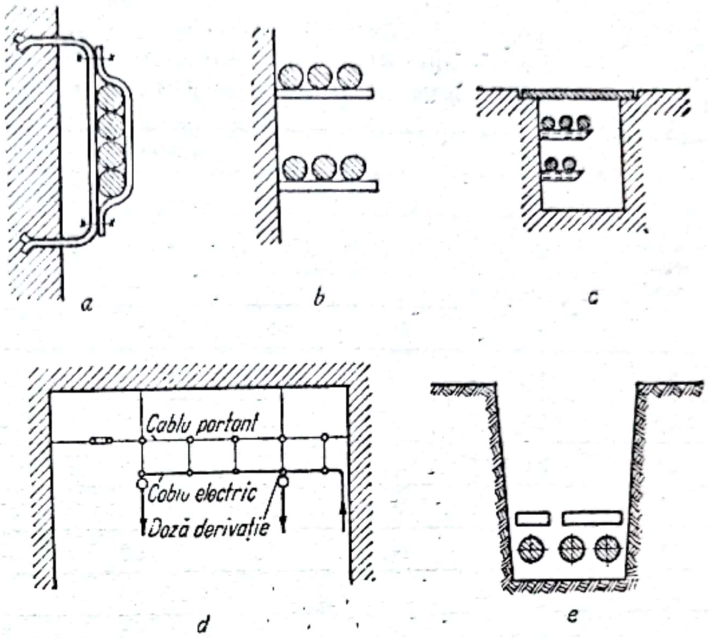


Fig. 1.21. Montarea cablurilor:
a — pe pereţi cu bride; *b* — pe pod de tablă; *c* — în canal de beton; *d* — suspendat; *e* — în şanţuri.

Tuburile izolante şi de protecţie sînt de trei categorii:

— izolante uşor protejate, cu manta metalică *IP*, din policlorură de vinil *IPY*, sau flexibile *IPF*; se montează aparent sau îngropat sub tencuială, în încăperi de categoriile U_0 şi U_1;

— de protecţie, cu manta metalică rigidă *P* sau flexibilă *PF*; se montează aparent în încăperi de categoriile U_0, U_1 şi T_0;

— etanşe şi de protecţie, cu manta metalică *IPE* şi *PEL*, din policlorură de vinil *IPEY* sau ţeavă de oţel pentru instalaţii *T*; se montează aparent sau îngropat, sub tencuială sau în pardoseală, în încăperi de categoriile U_2, U_3 şi *P*.

Diametrele tuburilor în funcţie de secţiunea şi numărul conductelor sînt indicate în lucrarea [30].

În instalaţiile fixe se utilizează şi următoarele tipuri de conducte:

— plate *FYY* şi *AFYY* montate îngropat în elementele incombustibile ale construcţiei sau în canalele elementelor de beton şi plate în execuţie specială *AFYYS* înglobate la turnare în elementele de beton vibrate;

— învelite, rezistente la intemperii (*FI*, *AFI*, *FCI* şi, *AFCI*) montate pe izolatoare, în exteriorul clădirilor.

Conductele pentru instalaţii mobile au conductoarele din cupru multifilar cu izolaţie şi manta de cauciuc sau PVC (cordoane *MCU*, *MCM*, *MYYM*, *MCG* şi cabluri pentru sudară *CSud*).

Cablurile pentru circuite secundare au un număr mare de conductoare (2...47) din cupru de secţiune mică (1,5...10 mm²) şi se clasifică în ca-

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.7

Intensitățile maxime admisibile ale curenților în regim permanent pentru conductoare din cupru sau aluminiu, cu izolație de cauciuc sau PVC, la temperatura mediului ambiant + 25°C [30].

Secțiunea conductoarelor, mm²	*Intensitățile curenților, A*							
	Cupru				Aluminiu			
	Conducte montate liber în aer, în interior	*Numărul conductoarelor montate într-un tub*			Conducte montate liber în aer, în interior	*Numărul conductoarelor montate într-un tub*		
		2	3	4		2	3	4
1	17	16	15	14	—	—	—	—
1,5	23	19	17	16	—	—	—	—
2,5	30	27	25	25	24	20	19	19
4	41	38	35	30	32	28	28	23
6	50	46	42	40	39	36	32	30
10	80	70	60	50	60	50	47	39
16	100	85	80	75	75	60	60	55
25	140	115	100	90	105	85	80	70
35	170	135	125	115	130	100	95	85
50	215	185	170	150	165	140	130	120
70	270	225	210	185	210	175	165	140
95	330	275	255	225	255	215	200	175
120	385	315	290	268	295	245	225	200
150	440	360	330	—	340	275	255	—

bluri de control *CCHPBI*, de măsură și comandă *CMYYBI*, de semnalizare și blocare *CSYYBI*.

b. **Aparate electrice.** Aparatele utilizate în instalațiile de joasă tensiune [7] se pot clasifica din punct de vedere al funcțiunilor pe care le îndeplinesc în următoarele categorii:

— aparate de conectare, ce servesc pentru stabilirea și întreruperea manuală a circuitelor parcurse de curentul nominal — întreruptoare și comutatoare pentru instalațiile de iluminat, întreruptoare cu pîrghie (I_n = = 25 ... 1 000 A), întreruptoare și comutatoare pachet (I_n = 10 ... 63 A), comutatoare cu came, separatoare, prize cu fișe și cuple;

— aparate de protecție a motoarelor și rețelelor electrice împotriva suprasarcinilor, scurtcircuitelor sau lipsei de tensiune — siguranțe fuzibile, contactoare cu relee și întreruptoare automate;

— aparate de măsurat;

— aparate pentru semnalizări luminoase sau acustice ale situațiilor normale sau anormale de funcționare a instalației supravegheate — relee și lămpi de semnalizare, sonerii, hupe.

Scanned with OKEN Scanner

Caracteristicile tehnice ale aparatelor de protecţie sînt: curentul nominal, tensiunea nominală, caracteristica de topire (protecţie) şi curentul de rupere.

Siguranţele fuzibile de joasă tensiune realizează protecţia împotriva scurtcircuitelor. Curenţii nominali ai fuzibilelor sînt: 0,5; 2; 4; 6; 10; 16; 20; 25; 35; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 630 A.

Din punct de vedere al puterii de rupere se deosebesc:

— siguranţe cu mică putere de rupere ($I_r = 350$ A) de tip unipolare cu filet mignon;

— siguranţe cu putere de rupere medie ($I_r = 1 \ldots 15$ kA) de tip deschis cu mîner de bachelită şi unipolare cu filet;

— siguranţe cu mare putere de rupere ($I_r = 15 \ldots 25$ kA) de tip *MPR*.

Siguranţele deschise cu mîner de bachelită au elementul fuzibil constituit dintr-o lamelă ştanţată de zinc, pentru curenţi nominali între 100 şi 350 A. Caracteristicile de protecţie, care exprimă dependenţa timpului de topire al fuzibilului de valoarea curentului eficace, sînt reprezentate în figura 1.22, *a*: curentul maxim de rupere este de 1 kA.

Siguranţele unipolare cu filet (tip *LF*, *LFi* şi *LS*) au fuzibilul de argint (2...100 A) introdus într-un patron de porţelan care conţine nisip de cuarţ ca mediu de stingere. În ţara noastră aceste siguranţe se fabrică cu fuzibile rapide (fig. 1.22, *b*) urmînd să se producă şi cu fuzibile lente (fig. 1.22, *c*).

Siguranţele cu mare putere de rupere (tip *MPR*) sînt executate în două variante din punct de vedere al curentului nominal: 40 ... 400 A c.c. şi 100 ... 630 A c.a. Caracteristicile de protecţie sînt indicate în figura 1.22, *d*. Patroanele se echipează cu fuzibile rapide şi ultrarapide.

Siguranţele fuzibile fabricate în străinătate sînt de tipul celor unipolare cu filet şi cu mare putere de rupere, tendinţele fiind în direcţia măririi capacităţii de rupere şi a diversificării caracteristicilor de protecţie [15] şi [28].

Contactoarele cu relee asigură protecţia împotriva suprasarcinilor, prin relee termice (reglabile între 0,6 ... 1 $\times$ I_s) şi a scăderii sau lipsei tensiunii, prin relee de tensiune minimă; protecţia contra scurtcircuitelor se realizează prin siguranţe fuzibile rapide montate înaintea contactorului. Contactoarele cu relee se utilizează în special pentru protecţia motoarelor electrice.

Contactoarele se execută în variantele:

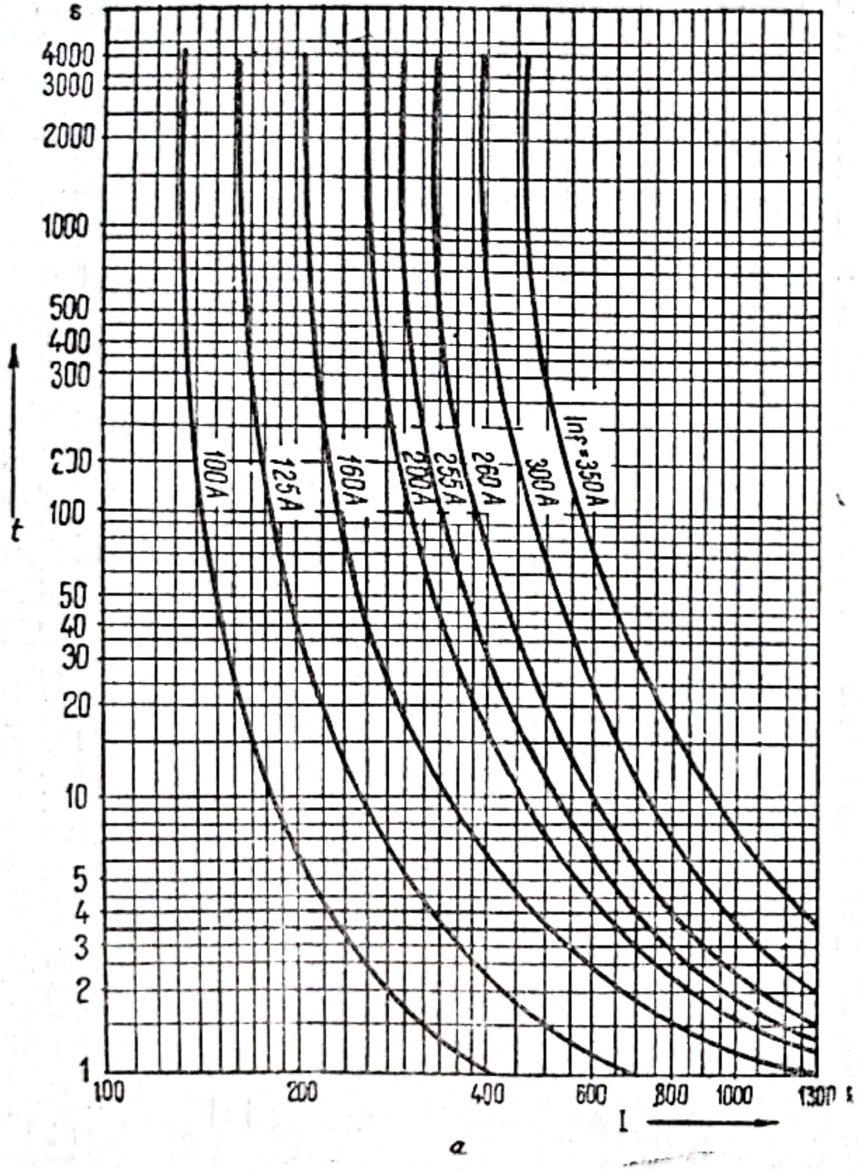
— contactoare cu relee în aer, avînd curentul nominal $I_n = 10$, 25, 40, 63, 100, 160 şi 200 A.

— contactoare cu relee în ulei, avînd $I_n = 16$, 25, 63 şi 100 A;

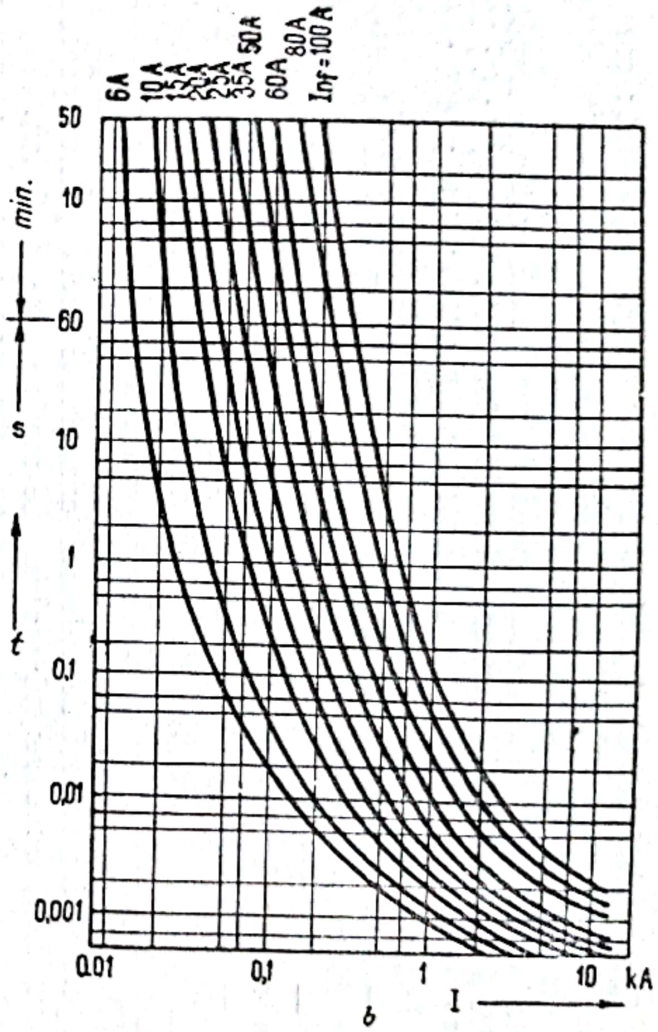
— contactoare cu relee tip *TCA* (licenţă BBC), avînd $I_n = 6{,}10$, 32, 40, 63, 100, 160, 250, 400 A.

Releele termice (tip *TSA*) ale acestor contactoare au curenţii de serviciu: 0,19 ... 10 A (tip *TSA* — 10), 0,4 ... 32 A (*TSA* — 30 *P*), 40 ...63 A (*TSA* — 63 *P*) şi 100 ... 400 A (*TSA* W 400 *P*); caracteristicile lor de protecţie sînt indicate în figura 1.23 *a* şi *b*.

Scanned with OKEN Scanner


s
4000
3000
2000
1000
500
400
300
200
100
50
40
30
20
10
5
4
3
2
1
t
100A
125A
160A
200A
255A
260A
300A
Inf=350A
100
200
400
600
800
1000
1300 s
I

a


6A
10A
15A
20A
25A
35A
50A
60A
80A
Inf=100A
50
10
min.
60
s
10
1
0,1
0,01
0,001
t
0.01
0,1
1
10 kA
I

b

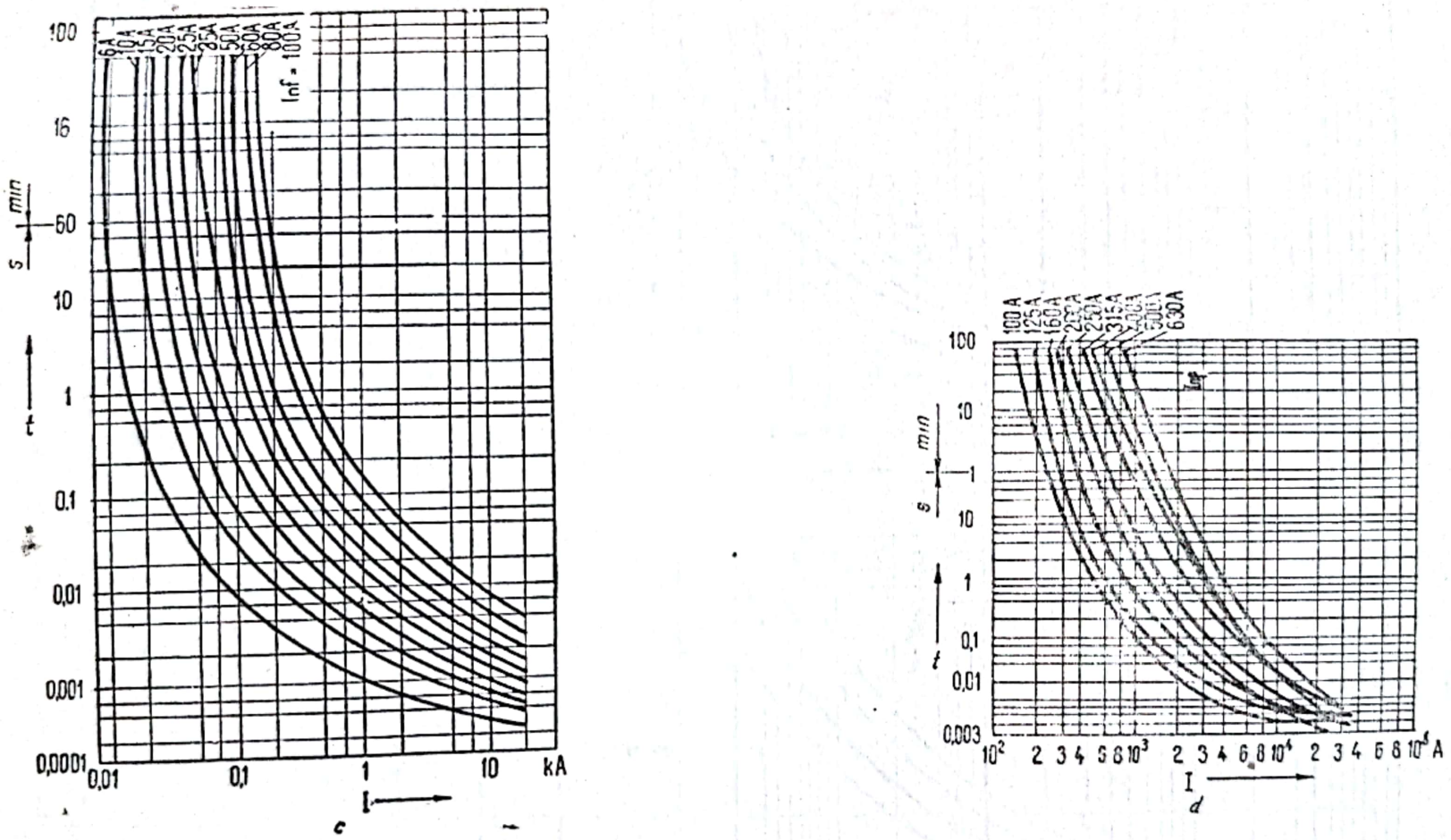
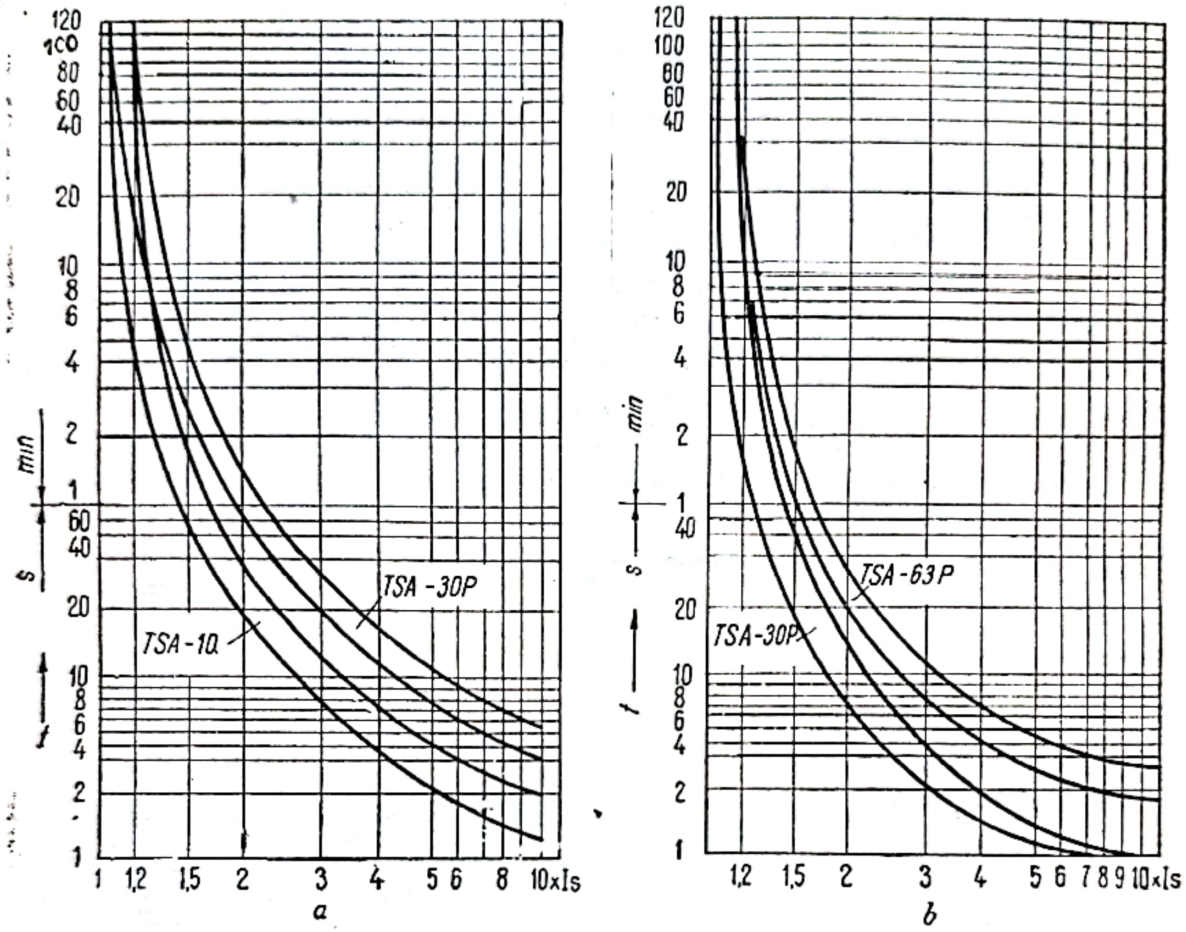


Fig. 1.22. Caracteristicile de protecţie ale siguranţelor fuzibile, tip Electroaparataj:
a — deschise cu mîner; *b* — unipolare cu filet (rapide); *c* — unipolare cu filet (lente); *d* — cu mare putere de rupere.

Scanned with OKEN Scanner



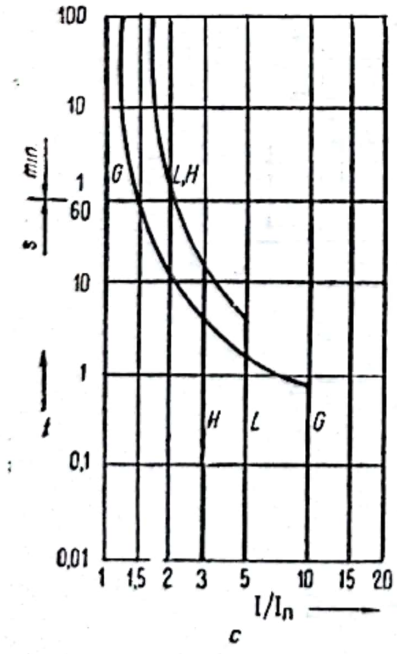


Fig. 1.23. Caracteristicile de protecție ale:
a — releelor termice tip *TSA*—10 și *TSA*—30 *P*, $I_s < 11$ A;
b — releelor termice tip *TSA*—30 *P* și *TSA*—63 *P*, $I_s > 11$ A;
c — întrerupătoarelor automate tip BBC—STOTZ KONTAKT.

Scanned with OKEN Scanner

Întreruptoarele automate de joasă tensiune asigură protecția împotriva suprasarcinilor, a scurtcircuitelor (prin relee electromagnetice) și a lipsei sau scăderii tensiunii. Se utilizează la protecția motoarelor electrice (relee electromagnetice reglate la 3 ... 10 $\times$ I_s) și a liniilor sau coloanelor de forță (relee electromagnetice reglate la 3 ... 6 $\times$ I_s).

Întreruptoarele automate se fabrică în variantele:

— *AMT* — 200 și 400 A, I_s = 10 ... 400 A și I_r = 8 kA, respectiv 16 kA;

— *DITA* — 1 000 A, I_s = 600 ... 1 000 A și I_r = 25 kA;

— *CAR* — 100 și 200 A, I_s = 10 ... 400 A, utilizate numai pentru protecția liniilor fiind prevăzute cu reanclanșare.

Aceste întreruptoare sînt echipate cu relee termice de tip *TSA* și relee electromagnetice cu acționare instantanee, caracteristicile lor de protecție avînd alura caracteristicii din figura 1.32, *c*.

În scopul diversificării întreruptoarelor automate din punct de vedere al curenților nominali, reglajelor releelor și caracteristicilor de protecție realizate cu relee electromagnetice cu acționare instantanee și temporizată, uzina „Electroaparataj" produce următoarele tipuri:

— *OTOMAX P2C*, I_n = 1 000, 1 600, 2 000 și 2 500 A, I_s = 300 ... 2 500 A, I_r = 50 kA, cu relee termice și electromagnetice (declanșator H)

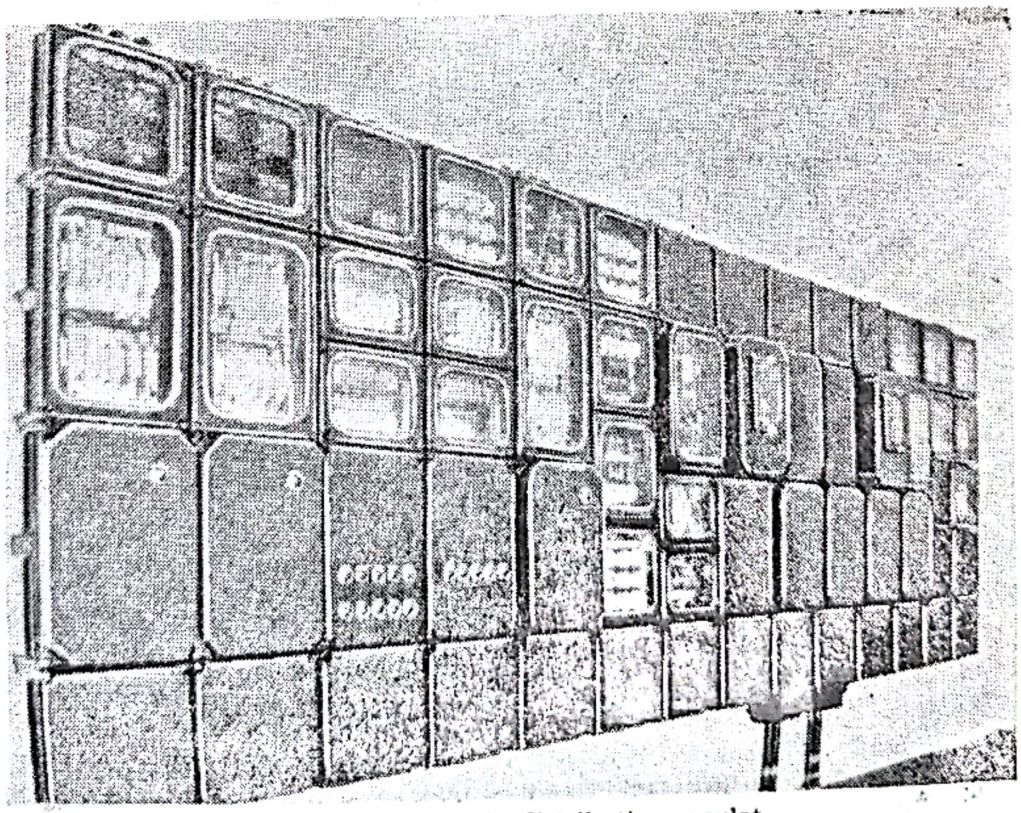


Fig. 1.24. Tablou de distribuție capsulat.

Scanned with OKEN Scanner

sau cu relee electromagnetice avînd caracteristică în trei trepte și cu temporizare independentă de curent (declanșator U_{si}), releu de tensiune minimă;

— *ISOL* — 100 și 250 *A*, $I_s = 2{,}5 \ldots 250$ A, $I_r = 10$ kA, cu relee termice și releu de tensiune minimă temporizat;

— întreruptor automat monopolar tip *BBC—STOTZ KONTAKT* de 25 A, $I_s = 6$, 10, 16 și 25 A, $I_r = 1{,}5$ kA, avînd relee termice și electromagnetice instantanee pentru circuitele de lumină *L*, prize *H* și forță *G* (fig. 1.23, *c*).

c. **Tablouri de distribuție.** Aparatele de conectare, de protecție, de măsură și de semnalizare din instalațiile de distribuție a energiei electrice sînt concentrate în tablouri de distribuție, destinate a permite exploatarea instalației respective în bune condițiuni și conform schemelor electrice.

Tablourile de distribuție pot fi:

— deschise, din marmură sau metal [8], instalate în nișe, pe pereți sau în încăperi separate;

— închise în dulapuri metalice, de exemplu tipul sertaro-bloc, fiecare sertar conținînd aparatele aferente unui circuit (fig. 1.5);

— capsulate, compuse din cutii metalice sau materiale plastice, închise etanș, asamblate conform schemei electrice (fig. 1.24).

1.5. CALCULUL INSTALAȚIILOR ELECTRICE DE JOASĂ TENSIUNE

Conductoarele electrice se dimensionează astfel încît să satisfacă simultan următoarele condiții: rezistență mecanică, stabilitate termică, pierdere de tensiune și stabilitate termică și dinamică la scurtcircuit.

Conductoarele trebuie să aibă o rezistență mecanică suficientă astfel încît să nu se deterioreze din cauza eforturilor la care sînt supuse în timpul montării și exploatării. Secțiunile minime admisibile care asigură rezistențele mecanice minime pentru diferite categorii de conductoare sînt date în lucrarea [30].

Dimensionarea instalațiilor electrice de joasă tensiune se face pe baza stabilității termice (a încălzirii maxime admisibile produsă de trecerea curentului electric), verificîndu-se apoi pierderea de tensiune în rețea și stabilitatea termică și dinamică la scurtcircuit.

Calculele se fac cu ajutorul schemei electrice de calcul determinată în modul următor:

— pe planul de situație al consumatorului, care conține construcția clădirii, la o scară convenabilă, se trec mașinile de lucru împreună cu motoarele electrice de acționare și toate celelalte receptoare electrice, însoțite de caracteristicile lor de funcționare:

— se fixează locurile tablourilor de distribuție și pe baza schemei de distribuție aleasă în conformitate cu § 1.4.1, se stabilește traseul circuitelor și coloanelor electrice.

Scanned with OKEN Scanner

1.5.1. Determinarea secțiunii conductoarelor pe baza încălzirii maxime admisibile.

Pentru a nu periclita starea conductoarelor sau a izolației lor, este necesar ca temperatura acestora să nu depășească anumite valori maxime admisibile (tab. 1.8) în regim permanent, conductoarele putînd fi parcurse de curenții de sarcină de durată, de curenții de suprasarcină de durată (de exemplu: funcționarea în două faze, supraîncărcarea motoarelor electrice etc) și de curenții de scurtcircuit. Deoarece acțiunea curenților de scurtcircuit și de suprasarcină este limitată prin aparate de protecție, rezultă că stabilitatea termică a conductoarelor este determinată de curentul de sarcină de durată.

Tabela 1.8

Temperaturile maxime admisibile în regim permanent [30].

Materialul	Temperatura maximă admisibilă, °C
Conductoare neizolate și bare	+70
Conductoare și cabluri cu izolație de cauciuc	+60
Conductoare și cabluri cu izolație de PVC	+65
Cabluri cu izolație de hîrtie	+65

Cantitatea de căldură primită de conductor prin efect Joule-Lenz în regim staționar, este cedată integral mediului ambiant, temperatura conductorului menținîndu-se constantă. Relația echilibrului termic

$$I_a^2 \rho [1 + k_\rho(\theta_a - \theta_{20})] \frac{l}{s} = \alpha A (\theta_a - \theta_i) \qquad (1.12)$$

în care: I_a este curentul maxim admisibil prin conductor;

ρ — rezistivitatea conductorului la temperatura de referință θ_{20}:

k_ρ — coeficientul de creștere a rezistivității cu temperatura;

θ_a — temperatura maximă admisibilă a conductorului (tab. 1.8);

l, s — lungimea și secțiunea conductorului;

α — coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție și radiație;

A — suprafața (laterală) și cedare a căldurii;

θ_i — temperatura mediului ambiant,

Scanned with OKEN Scanner

permite determinarea valorii admisibile a curentului prin conductor, în regim permanent

$$I_a = \sqrt{\frac{\alpha A(\theta_a - \theta_i)}{\rho[1 + k_\rho(\theta_a - \theta_{20})\frac{l}{s}}} \qquad (1.13)$$

Valorile curentului maxim admisibil pentru diferite tipuri, dimensiuni și anumite temperaturi de montaj ale conductoarelor sînt date în tabelele 1.5, 1.6 și 1.7; în cazul pozării conductoarelor în alte condiții decît cele indicate în aceste tabele, se va aplica o corectare a valorilor intensităților maxime admisibile cu coeficienții de corecție indicați în tabelele 1.9 și 1.10.

Alegerea secțiunii conductorului se face în următoarea succesiune:

a. Din puterea instalată P_i se determină curentul cerut I_c al circuitului care alimentează un singur receptor sau al coloanei care alimentează o categorie de receptoare. În cazul coloanei, pentru a ține seama de influența numărului și puterii diferitelor receptoare, se introduce un coeficient de cerere corectat

$$k'_c = k_a + \frac{1 - k_c}{k_a},$$

Tabela 1.9

Coeficienții de corecție datorați temperaturii mediului ambiant [30].

Temperatura, °C / Tipul conductei	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40
Conductoare neizolate și bare, montate în aer	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81
Conductoare izolate în cauciuc sau PVC montate în aer sau în tuburi de protecție	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
Cablu cu izolație și manta de PVC pozat în pămînt sau aer	1,15	1,10	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75
Cablu cu izolație și manta de cauciuc, pozat în pămînt sau aer	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,65
Cablu cu izolație de PVC sau cauciuc și manta de plumb, pozat în pămînt sau aer	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,65
Cablu cu izolație de hîrtie impregnată și manta de plumb, pozat în pămînt sau aer	1,15	1,10	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.10

a. Coeficienții de corecție în cazul pozării mai multor cabluri în același șanț sau a pozării lor în aer [30].

Modul de pozare a cablurilor	Numărul de cabluri					
	1	2	3	4	5	6
Într-un singur strat în același șanț, la intervale de 7 cm.	1	0,9	0,8	0,75	0,7	0,65
Pe pereți sau pe rastele la intervale egale cu diametrul cablului	0,8	0,75	0,75	0,7	0,7	0,7
Idem, fără distanță între cabluri	0,8	0,65	0,65	0,6	0,6	0,6
În canale acoperite, la intervale egale cu diametrul cablului (informativ)	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

b. Coeficienții de corecție în funcție de rezistența calorică specifică a solului în care se pozează cablul [30].

Tipul de sol	Coeficient	Tipul de sol	Coeficient
Teren umplut cu zgură, uscat	0,43	Teren nisipos uscat	0,90
Teren obișnuit uscat	0,57	Idem 8% umiditate	1,05
Nisip 10% umiditate	0,87	Idem cu humă sau lut	1,03
Idem 20% umiditate	0,98	Teren umed sau mlăștinos	1,17
Idem îmbibat cu apă	1,07	Rocă dură	1,22

în care k_c este coeficientul de cerere al categoriei de receptoare (tab. 1.1), iar k_a — coeficient de influență al numărului de receptoare

Număr receptoare	4	6	10	15	20	30	40	50
k_a	1,7	2,5	3,3	3,7	4,3	8	9,1	10

Pentru coloanele care alimentează mai multe categorii de receptoare, curentul de calcul se obține prin însumarea aritmetică a curenților de cerere corectați.

Scanned with OKEN Scanner

b. Se determină curentul maxim (vîrf sau de pornire) al unui motor electric

$$I_p = \lambda I_n, \tag{1.14}$$

în care λ este valoarea relativă a curentului de pornire indicată în catalog sau în lucrarea [8], iar I_n — curentul nominal al motorului.

c. Siguranțele fuzibile lente sau rapide se aleg pe baza condiției

$$I_{nf} \geqslant I_c, \tag{1.15}$$

I_{nf} fiind curentul nominal al siguranței; în cazul alegerii siguranțelor fuzibile rapide, pentru ca acestea să nu se topească la pornirea motoarelor, relația (1.15) se completează cu condiția

$$I_{nf} \geqslant \frac{I_p}{c}, \tag{1.16}$$

în care c este un coeficient de siguranță egal cu 2,5 pentru porniri ușoare (durata pornirii este de 5 ... 10 A) sau 1,5 pentru porniri grele (10 ... 40 s), condiție rezultată din alura caracteristicilor de protecție ale siguranțelor respective (§ 1.4.2).

În cazul unei coloane care alimentează n motoare, dintre care k pornesc concomitent, relațiile (1.15) și (1.16) devin

$$I_{nf} \geqslant \sum_{i=1}^{n} I_{c_i} \tag{1.17}$$

și

$$I_{nf} \geqslant \sum_{j=1}^{k} \frac{I_{p_j}}{c} + \sum_{i=n-k}^{n} I_{c_i}, \tag{1.18}$$

termenul al doilea al sumei din membrul drept reprezentînd suma curenților ceruți de motoarele în funcțiune.

În anumite cazuri la curenți mari de pornire, folosirea siguranțelor rapide conduce la mărirea secțiunii conductoarelor, în aceste situații recomandîndu-se alegerea siguranțelor lente.

d. Curentul admisibil în conductor trebuie să fie egal sau mai mare decît curentul cerut

$$I_a \geqslant I_c \tag{1.19}$$

și decît ψI_{nf},

$$I_a \geqslant \psi I_{nf} \tag{1.20}$$

unde ψ este valoarea limită inferioară a raportului dintre curenții admisibili în conductoare și curenții nominali ai siguranțelor fuzibile, pentru condițiile date de montaj (tab. 1.11). Folosirea coeficientului ψ este legată de consumul minim de metale neferoase și de siguranța în funcționare a rețelei respective.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.11

Valorile limită ale raportului între curenții admisibili în conductoare și curenții nominali ai siguranțelor fuzibile [9].

Denumirea încăperii	Destinația rețelelor	Modul de instalare al rețelelor	$\psi = \frac{I_a}{I_{nf}}$
Locuințe, localuri publice birourile și încăperile de serviciu din întreprinderi	Rețele de forță și iluminat	Conductoare în țevi sau montate pe suporturi izolante	1,25 1,66
		Cabluri	1,00
Încăperi de producție ale întreprinderilor industriale	Rețele de forță	Fideri și linii principale montate în țevi	0,66
		Idem, montate pe suporturi izolante	0,85
		Idem, montate prin cabluri subterane	0,66
		Derivații spre receptoare cu regim prelungit de funcționare, montate în țevi	0,33
		Idem, montate descoperit pe suporturi izolante	0,85
		Idem, montate prin cabluri	0,33
		Derivații spre receptoare cu regim de funcționare de scurtă durată, montate prin conductoare în țevi sau prin cabluri	0,5
	Rețele de iluminat	Fideri, linii principale și derivații montate prin conductoare în țevi, în aer liber pe suporturi izolante sau prin cabluri	1
Încăperi în care există pericol de explozie	Rețele de forță și de iluminat	Fideri, linii principale și derivații pentru receptoare cu orice regim de funcționare, conductoarele fiind montate în țevi	1,25
		Idem, dar executate prin cabluri	1

Astfel, în cazul caselor de locuit, al localurilor publice etc. $\psi = 1{,}25$, ceea ce conduce la alegerea unei secțiuni mai mari, lucru impus de faptul că în locuințe etc., controlul sarcinii este practic imposibil.

Pentru încăperi industriale coeficientul ψ are valori mai reduse, ceea ce permite o utilizare mai bună a conductoarelor electrice; acest lucru este posibil deoarece în rețelele industriale sînt excluse racordările neverificate de noi receptoare.

e. Din tabelele 1.5, 1.6 și 1.7 se alege secțiunea conductorului corespunzătoare curentului admisibil I_a. Secțiunea conductorului de nul de lucru, în sistemele trifazate cu patru conductoare, trebuie să fie cel puțin 50% din secțiunea conductoarelor de fază.

f. La instalațiile electrice de forță se va verifica densitatea de curent în conductoare la pornirea motoarelor; valoarea maximă a acesteia nu trebuie să depășească 35 A/mm² pentru cupru și 20 A/mm² pentru aluminiu. În caz

Scanned with OKEN Scanner

Determinarea secţiunii conductoarelor pe baza încălzirii maxime admisibile, alegerea

Nr. crt.	Mărimea		Relaţia	ASI–112 M/4 kW
1	Factorul de putere nominal		$\cos \varphi_n$	0,87
2	Randamentul nominal		η_n	0,85
3	Valoarea relativă a curentului de pornire		λ	6,5
4	Curentul nominal		$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}$ [A]	$\frac{4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,85} = 8,19$
5	Curentul cerut		$I_c = I_n \sqrt{DA_n}$ [A]	8,19 A
6	Curentul de pornire	direct	I_p (1.14) [A]	6,5 · 8,19 = 53,15
7		CST	$I_p = \lambda I_n/3$ [A]	–
8	Siguranţa fuzibilă rapidă	dimensionare	(1.15) şi (1.16) [A]	$I_{nf} > 8,19$ şi $I_{nf} > \frac{53,15}{2,5} = 21,2$
9		alegere	–	LFi 25/25
10	Curentul de serviciu al contactorului		I_s [A]	10
11	Releul termic al contactorului	dimensionare	(1.42) [A]	(1,05...1,2)8,19=8,6...9,8
12		reglajul posibil	$(0,6...1)I_s$ [A]	6...10
13		valoarea reglată	I_{rt} (1.45) [A]	$8 < \frac{25}{3}$
14	Contactorul automat		DITU	DITU 25
15	Curentul admisibil al conductorului		(1.19) [A]	$I_a \geq 8,19$
16			(1.20) [A]	$I_a \geq 0,33 \cdot 25 = 8,25$
17	Secţiunea, curentul admisibil normat		s'/I'_a tab. 1.7. [mm²]/[A]	2,5/19
18	Densitatea curentului de pornire		$j'_P = \frac{I_P}{s'} \leqslant 20$ [A/mm²]	$\frac{53,15}{2,5} = 21,3 > 20$
19	Secţiunea/curentul admisibil normat, recalculat		s/I_a [mm²]/[A]	4/23
20	Densitatea curentului de pornire, recalculată		j_p [A/mm²]	$\frac{53,15}{4} = 13,4$
21	Tipul conductorului		–	AFY 3×4 + FY 2,5
22	Tubul de protecţie		[30] ţeavă oţel [mm]	20

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.12.

și reglarea protecției, alegerea tuburilor izolante și de protecție pentru circuite

ASI–160 M/13 kW	ASI–180 M/17 kW	ASI–250 S/40 kW
0,89	0,87	0,905
0,88	0,89	0,895
6,5	6,5	6,5
$\frac{13 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}88} = 25{,}2$	$\frac{17 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}87 \cdot 0{,}89} = 33{,}5$	$\frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}905 \cdot 0{,}895} = 75$
25,2	33,5	75
$6{,}5 \cdot 25{,}2 = 164$	$6{,}5 \cdot 33{,}5 = 217{,}75$	$6{,}5 \cdot 75 = 486$
–	–	486/3 = 162A(CST200)
$I_{nf} > 25{,}2$ și $I_{nf} > \frac{164}{2{,}5} = 65{,}7$	$I_{nf} > 33{,}5$ și $I_{nf} > \frac{217{,}75}{2{,}5} = 87$	$I_{nf} > 75$ și $I_{nf} > \frac{162}{1{,}5} = 108$
LFi 100/80	LFi 100/100	MPR 315/125
40	40	80
(1,05...1,2)25,2 = = 26,5...30,2	(1,05...1,2)33,5 = = 35,2...40,2	(1,05...1,2)75 = 78,7...90
24...40	24...40	48...80
$25 < \frac{80}{3}$	$32 < \frac{100}{3}$	$48 \simeq \frac{125}{3}$
DITU 63	DITU 63	DITU 100
$I_a \geq 25{,}2$	$I_a \geq 33{,}5$	$I_a \geq 75$
$I_a \geq 0{,}33 \cdot 80 = 27$	$I_a \geq 0{,}33 \cdot 100 = 33$	$I_a \geq 0{,}33 \cdot 125 = 42$
6/30	10/39	35/85
$\frac{164}{6} = 27{,}3 > 20$	$\frac{217{,}75}{10} = 21{,}8 > 20$	$\frac{162}{35} = 4{,}6$
10/39	16/55	–
$\frac{164}{10} = 16{,}4$	$\frac{217{,}75}{16} = 13{,}6$	–
AFY 3 × 10 + FY 6	AFY 3 × 16 + FY 10	AFY 3 × 35 + FY 10
25	40	50

Scanned with OKEN Scanner

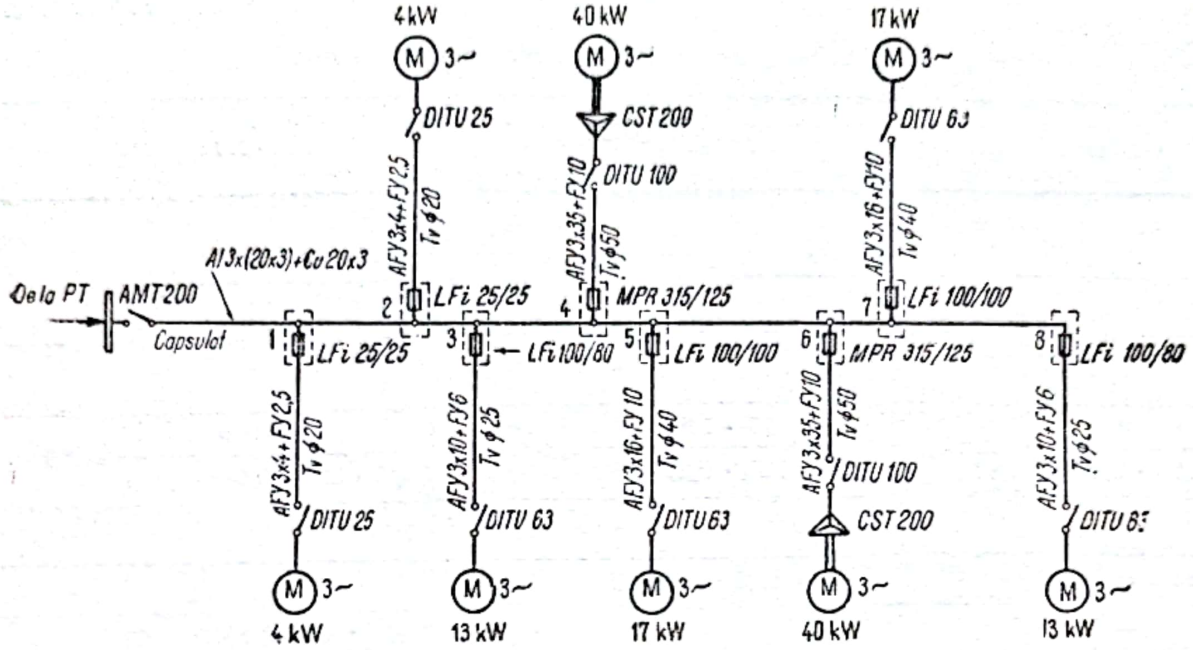


Fig. 1.25. Schema electrică monofilară a alimentării unei secţii.

contrar se va alege o secţiune superioară pentru conductoarele circuitului respectiv.

Exemplu: Să se calculeze instalaţia electrică de alimentare a motoarelor electrice dintr-o secţie. Instalaţia se realizează în schema bloc transformator — linie principală (fig. 1.25), din bare de aluminiu capsulate.

Determinarea secţiunii conductoarelor pe baza încălzirii maxime admisibile, alegerea şi reglarea protecţiei (§1.5.5) şi alegerea tuburilor izolante şi de protecţie pentru circuitele de alimentare (ramificaţiile) ale motoarelor sînt concentrate în tabela 1.12. În tabela 1.13 este cuprins calculul coloanei (linia principală).

Tabela 1.13

Determinarea secţiunii conductoarelor pe baza încălzirii maxime admisibile, alegerea şi reglarea protecţiei pentru coloane

Mărimea	Relaţia	Calculul	Rezultatul
Puterea instalată	$P_i = \sum_j^n P_{ij}$	2.4 + 2.13 + 2.17 + + 2.40	148 kW
Coeficientul de simultaneitate	k_s [8, cap Vb]	—	0,52
Curentul cerut de toate receptoarele	$I_c = k_s \frac{P_i}{\sqrt{3}\, U \cos\varphi}$; (tab 1.1)	$0{,}52 \frac{148 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}6}$	195 A

Tabela 1.13 (continuare)

Mărimea		Relația	Calculul	Rezultatul
Curentul cerut de (n−1) receptoare		$I_{cn-1} = k_s \frac{P_{in-1}}{\sqrt{3}\, U \cos\varphi}$	$0{,}52 \frac{131 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}6}$	173,55 A
Curentul de pornire		(1.18)	$173{,}55 + \frac{217{,}75}{2{,}5}$	260,5 A
Curentul admisibil în conductor		(1.19)	$I_a \geqslant 195$ A	—
Tipul conductorului		—	—	Bară de aluminiu
Secțiunea/curentul admisibil normat		(tab. 1.5)	—	20 × 3/225 [mm × mm]/[A]
Densitatea curentului de pornire		$j_p = \frac{I_p}{s} \leqslant 20$	$\frac{391{,}3}{20 \cdot 3}$	6,52 A/mm²
Curentul de serviciu al întreruptorului		$I_s > I_c$	—	200 A
Întreruptorul automat		AMT 200	—	—
Releul termic	dimensionare	(1.42)	(1,05...1,2)195	200...234 A
	reglaj posibil	$(0{,}6...1)I_s$	(0,6...1)200	120...200 A
	valoare reglată	I_{rt}		200 A
Releul electromagnetic	dimensionare	(1.43)	$I_{re} \leqslant 4{,}5 \cdot 225$	$I_{re} \leqslant 1012$ A
	reglaj posibil	$I_{re} = (3...6)I_s$	(3...6)200	600...1200 A
	valoare reglată	I_{re}	—	1000 A

1.5.2. Pierderea de tensiune

Pentru a asigura funcționarea în bune condiții a instalațiilor electrice la consumator, *pierderea de tensiune* datorită rezistențelor și reactanțelor conductoarelor

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_n} 100, \qquad (1.21)$$

în care U_1 este tensiunea la începutul liniei, U_2 — tensiunea la capătul considerat al liniei și U_n — tensiunea nominală a liniei, nu trebuie să depășească valorile din tabela 1.14.

La dimensionarea circuitelor pentru instalații de forță se va ține seama ca pierderile de tensiune la pornire să nu depășească valoarea maximă admisă de motorul respectiv.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.14

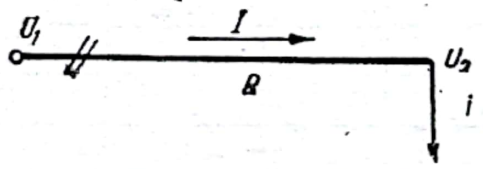
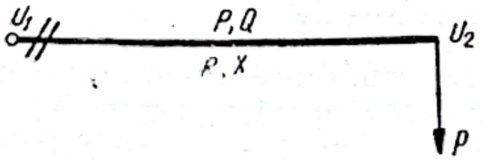
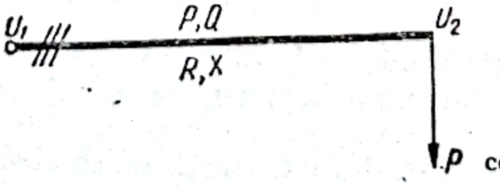
Valorile maxime admisibile ale pierderii de tensiune $\Delta U[\%]$, conform [30]

Sursa de alimentare	*Pierderea de tensiune maxim admisibilă*	
	Instalaţii de iluminat	Instalaţii de forţă
Reţeaua publică	3	5
Post de transformare sau centrală proprie	8	10

Calculul pierderilor de tensiune se face pe tronsoanele reţelei cu relaţiile indicate în tabela 1.15 [2], în care: R şi X reprezintă rezistenţa, respectiv reactanţa tronsonului (tab. 1.15); I, P, şi Q — curentul, puterea activă şi puterea reactivă cerute pe tronsonul respectiv; i, p — curentul şi puterea activă cerută de un receptor.

Tabela 1.15

Relaţiile de calcul pentru pierderea de tensiune [8]

Schema electrică	$\Delta U[\%]$
 curent continuu	$\frac{2\,RI}{U_n}\,100$
 curent alternativ monofazat	$2\,\frac{RP+XQ}{U_n^2}\,100$
 curent alternativ trifazat	$\frac{RP+XQ}{U_n^2}\,100$

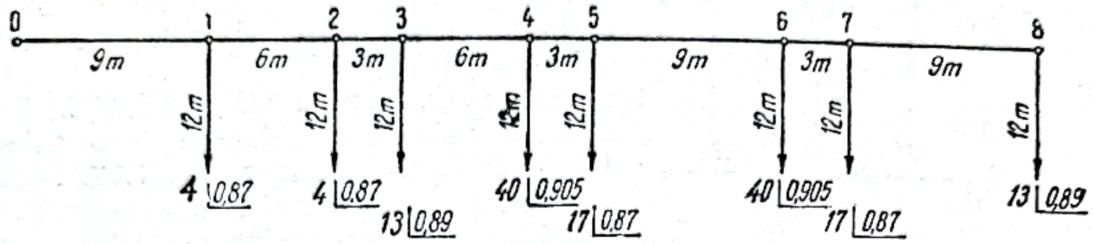


Fig. 1.26. Schema de calcul pentru pierderea de tensiune.

Dacă valorile indicate în tabela 1.14 sînt depășite se va alege o secțiune superioară pentru porțiunea respectivă a rețelei.

În cazul rețelelor cu linii principale buclate sau de tip plasă, calculul pierderilor de tensiune este mai complicat [5], necesitînd transformarea prin transfigurare a rețelei complexe într-o linie principală alimentată la ambele capete; pentru aceasta se determină punctul de separație al curenților, punct în care linia se poate separa în două porțiuni alimentate fiecare de la un singur capăt.

Tabela 1.16

Calculul pierderilor de tensiune ΔU[%].

Mărimea / Porțiunea		R [mΩ]	X [mΩ]	P [kW]	Q [kVAr]	ΔU[%]
Ramificația	1,2	86	—	4	2,2	0,24
	3,8	34,4	—	13	6,6	0,30
	5,7	21,4	—	17	9,5	0,26
	4,6	9,8	—	40	18,8	0,28
Tronsonul	7—8	4,3	1,35	13	6,6	0,03
	6—7	1,44	0,45	30	16,1	0,03
	5—6	4,3	1,35	70	34,9	0,24
	4—5	1,44	0,45	87	44,4	0,09
	3—4	2,85	0,90	127	63,2	0,30
	2—3	1,44	0,45	140	69,8	0,15
	1—2	2,85	0,90	144	72,0	0,30
	0—1	4,3	1,35	148	74,2	0,51

Valoarea maximă a pierderii de tensiune se obține pentru receptorul de pe ramificația *8*:

$$\Delta U_{max} = \Delta U_{0\cdots 8} + \Delta U_8 = (0{,}51 + 0{,}30 + 0{,}09 + 0{,}24 + 0{,}03 + 0{,}03) + 0{,}30 = 1{,}95\% \ll \Delta U_{adm} = 10\%.$$

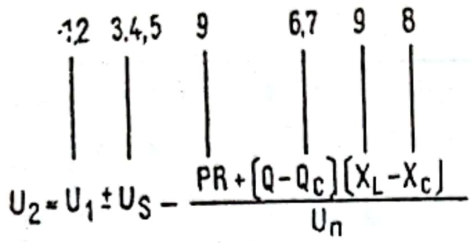


Fig. 1.27. Reprezentare schematică a metodelor de reglare a tensiunii U_2 la receptor:

1 — reglarea tensiunii cu ajutorul generatoarelor; *2* — variaţia raportului de transformare a transformatoarelor; *3* — utilizarea transformatoarelor survoltoare; *4* — regulatoare de inducţie; *5* — autotransformatoare de reglare; *6* — motoare sincrone; *7* — condensatoare în derivaţie; *8* — condensatoare în serie; *9* — deconectarea transformatoarelor care funcţionează în paralel.

Exemplu: Să se determine pierderea maximă de tensiune în instalaţia electrică calculată în § 1.5.1.

Schema de calcul a ΔU este dată în figura 1.26, valorile calculate conform tabelei 1.15 — fiind trecute în tabela 1.16. Pentru calculul rezistenţelor şi reactanţelor ramificaţiilor şi tronsoanelor s-a utilizat tabela 1.18 şi indicaţiile din lucrarea [8]; reactanţa conductoarelor montate în tuburi de protecţie se neglijează.

Reglarea tensiunii în reţelele electrice ale întreprinderilor industriale se poate face prin metodele indicate în figura 1.27. Dintre aceste metode cele mai utilizate sînt:

— variaţia raportului de transformare al transformatorului din postul de transformare (în limitele ±5%) cu ajutorul unui comutator de reglaj a tensiunii;

— utilizarea motoarelor sincrone supraexcitate (§ 1.6.3);

— utilizarea condensatoarelor derivaţie (§ 1.6.2) şi a condensatoarelor serie (compensarea longitudinală a reactanţei liniei) — [13];

— deconectarea transformatoarelor care funcţionează în paralel.

1.5.3. Calculul curenţilor de scurtcircuit în reţelele electrice de joasă tensiune

Curenţii de scurtcircuit în reţelele electrice au următoarele efecte:

— termice, care conduc la încălzirea puternică a înfăşurărilor sau a conductoarelor, la distrugerea izolaţiei, la arderea şi eventual sudarea contactelor aparatelor de conectare;

— dinamice (mecanice), datorate efectului electrodinamic al curenţilor, care conduc la deteriorarea bobinelor, îndoirea barelor etc.

Curentul de scurtcircuit se poate considera ca rezultat al suprapunerii a două componente, una periodică avînd valoarea eficace I_{sc}, corespunzătoare impedanţei reduse, care a produs scurtcircuitul şi o alta, tranzitorie aperiodică i_a, care are valoarea maximă în momentul producerii scurtcircuitului şi scade rapid (în 3—4 perioade) pînă la zero (fig. 1.28).

Deoarece impedanţa echivalentă a generatoarelor creşte în timpul scurtcircuitului, curentul de scurtcircuit are o valoare maximă la început $I_ş$, scăzînd apoi rapid pînă la o valoare de durată I_∞.

La reţelele de joasă tensiune alimentate prin transformatoare $I_{sc} = I_\infty$, deoarece impedanţele generatoarelor şi reţelelor de înaltă tensiune sînt neglijabile în raport cu cele ale transformatoarelor şi reţelelor de joasă tensiune.

În cele ce urmează se vor stabili relaţiile de calcul al curentului de scurtcircuit de durată I_{sc}, care produce efectul termic şi a curentului de şoc

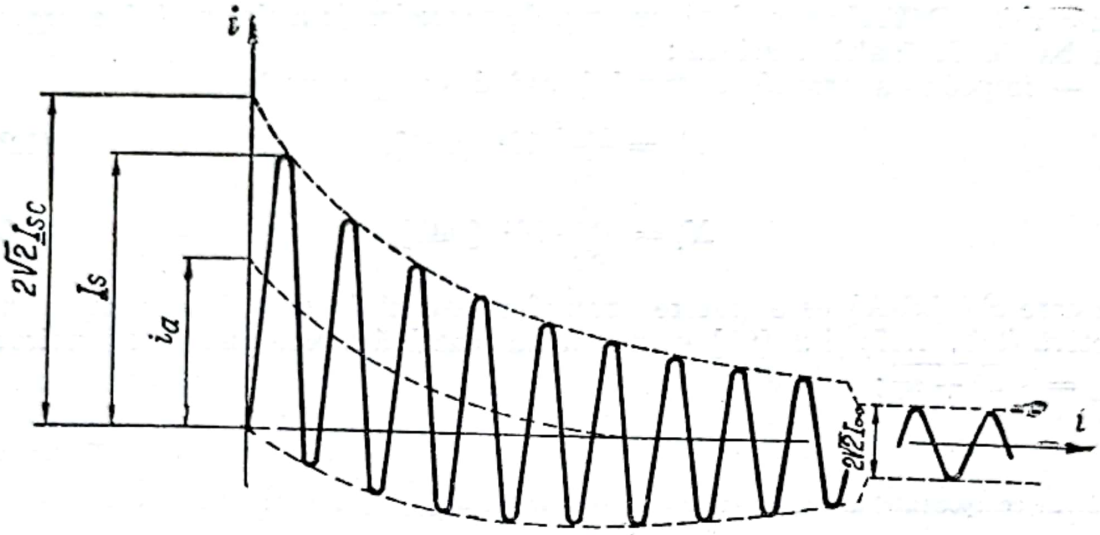


Fig. 1.28. Variația curentului de scurtcircuit.

$I_ş$, care produce efectul dinamic maxim, în scopul verificării elementelor şi reţelei electrice din punct de vedere al stabilităţii termice şi dinamice la scurtcircuit.

Valoarea eficace a curentului de scurtcircuit de durată, în kA, este dată de relaţiile:

$$I_{sc_3} = \frac{U}{\sqrt{3}Z}\,10^3 \quad \text{pentru scurtcircuitul trifazat,} \tag{1.22}$$

$$I_{sc_2} = \frac{U}{2Z}\,10^3 \quad \text{pentru scurtcircuitul bifazat,} \tag{1.23}$$

$$I_{sc_1} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z + Z_0)}\,10^3 \quad \text{pentru scurtcitcuitul monofazat,} \tag{1.24}$$

în care: U este tensiunea de linie la barele de joasă tensiune ale postului de transformare, în kV (0,4 kV);
Z — impedanţa unei faze a reţelei, în mΩ;
Z_0 — impedanţa conductorului neutru, în mΩ.

Curentul de scurtcircuit maxim apare în cazul scurtcircuitului trifazat [15] în reţelele de joasă tensiune.

Impedanţa unei faze a reţelei se compune din:

— impedanţa sistemului energetic pînă la barele de înaltă tensiune ale staţiei sau postului de transformare avînd rezistenţa

$$R_s \simeq 0{,}1\ X_s\ [\text{m}\Omega] \tag{1.25}$$

şi reactanţa

$$X_s = \frac{1{,}1\,U^2}{S_{sc}} \cdot 10^3\ [\text{m}\Omega], \tag{1.26}$$

în care S_{sc} [MVA] reprezintă puterea de scurtcircuit a sistemului energetic la barele de înaltă tensiune:

— impedanța transformatorului avînd componentele

$$R_T = \frac{u_r U^2}{S_T} 10^4 \ [\text{m}\Omega], \tag{1.27}$$

$$X_T = \frac{u_x U^2}{S_T} 10^4 \ [\text{m}\Omega], \tag{1.28}$$

în care S_T [kVA] este puterea transformatorului, u_r [%] — componenta activă (tab. 1.17) și u_x [%] componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit $u_{sc} = \sqrt{u_r^2 + u_x^2}$;

Tabela 1.17

Valorile componentei active a tensiunii de scurcircuit u_r [%] pentru transformatoarele de forță [15]

S_T [kVA]	100	160	250	400	630	1000	1600
$u_r^{[\%]} = 100 \frac{p_{cu}^{[kW]}}{S_T}$	2,3	2	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2

— impedanța bobinelor de reactanță montate pentru limitarea curenților de scurtcircuit, avînd

$$R_b \simeq 0, \tag{1.29}$$

$$X_b = \frac{x_b U}{\sqrt{3} I_b} 10^4 \ [\text{m}\Omega], \tag{1.30}$$

în care x_b [%] reprezintă reactanța procentuală a bobinei și I_b[A] — curentul nominal;

— impedanța liniilor electrice avînd secțiunea s în mm² și lungimea l în km, este indicată în tabela 1.18.

Tabela 1.18

Impedanța liniilor electrice de joasă tensiune [15]

Tipul liniei	Rezistența R_l[mΩ]	Reactanța X_l[mΩ]
Cabluri	Cu: $\frac{17{,}9 \cdot 10^3}{s} l$	75 l
Linii electrice aeriene		300 l
Bare	Al: $\frac{28{,}6 \cdot 10^3}{s} l$	500 l

Scanned with OKEN Scanner

Dacă schema electrică conţine şi linii electrice la tensiuni U_l diferite de $U = 0{,}4$ kV, componentele impedanţei pe fază vor fi

$$R_l = Rl\left(\frac{U}{U_l}\right)^2, \tag{1.31}$$

$$X_l = Xl\left(\frac{U}{U_l}\right)^2, \tag{1.32}$$

în care R, X [mΩ/km] sînt rezistenţa, respectiv reactanţa liniei la tensiunea U_l [29].

În cazul funcţionării în paralel a n transformatoare de aceeaşi putere, S_T din relaţiile (1.27) şi (1.28) va reprezenta suma puterilor transformatoarelor.

Curenţii de scurtcircuit în reţele protejate prin siguranţe fuzibile sînt reduşi, datorită efectului limitator al acestora. Curentul de scurtcircuit după siguranţă (în sensul transformator-receptor) are valoarea I'_{sc} rezultată din curentul I_{sc} cu siguranţa şuntată şi din caracteristica de protecţie a siguranţei (fig. 1.29).

Calculul simplificat al curentului de şoc se face cu relaţia

$$I_ş = k\sqrt{2}I_{sc}, \tag{1.33}$$

în care coeficientul k depinde de raportul rezistenţei şi reactanţei totale de scurtcircuit (fig. 1.30).

În impedanţa totală intervin şi diferitele rezistenţe de contact ale aparatelor, rezistenţa arcului electric etc., mărimi care sînt greu de cuprins în calcul; de aceea curenţii de scurtcircuit obţinuţi prin experimentări au valori mai mici decît cei calculaţi.

Exemplu. Să se determine curenţii de scurtcircuit de durată şi de şoc în punctul A al reţelei din figura 1.31. Calculele sînt cuprinse în tabela 1.19.

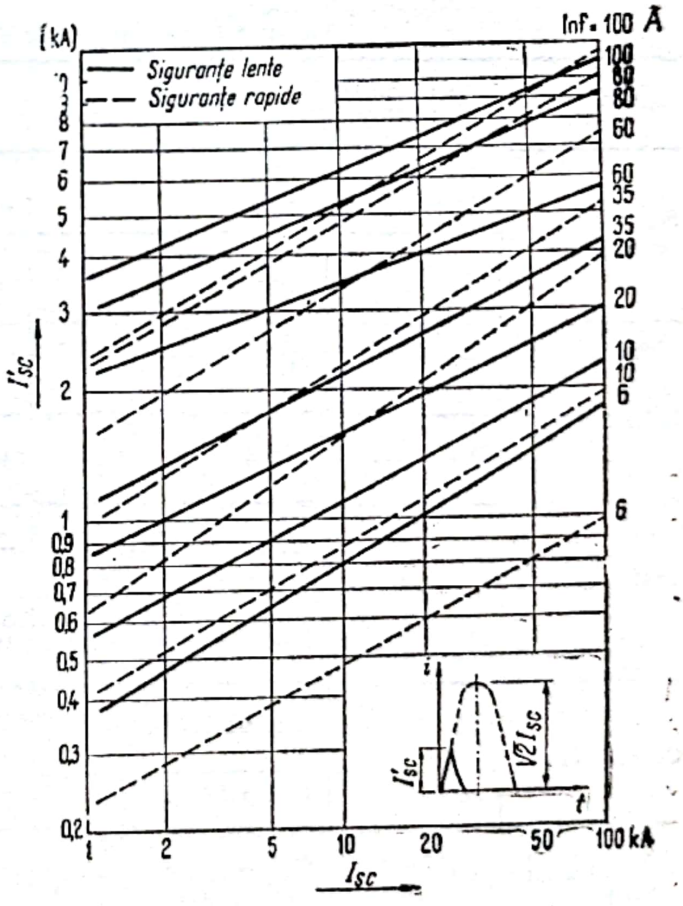


Fig. 1.29. Efectul limitator al siguranţelor unipolare cu filet.

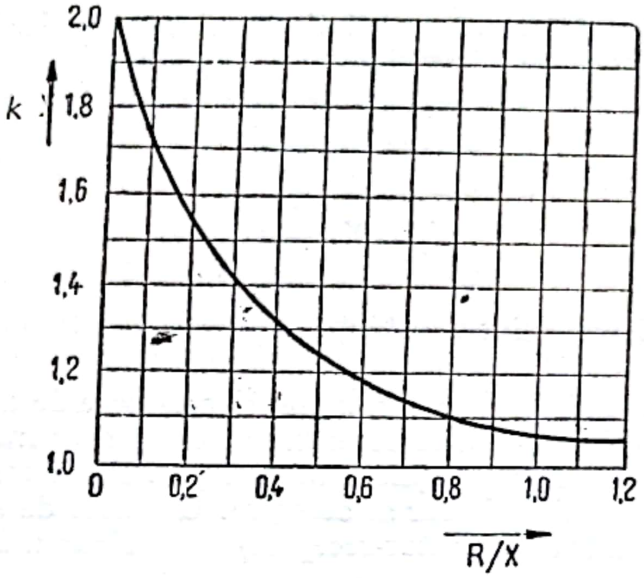


Fig. 1.30. Coeficientul k al curentului de șoc.

Tabela 1.19

Calculul impedanțelor de scurtcircuit

Elementul rețelei	Componentele impedanței	Relația de calcul	Calculul	Rezultatul [mΩ]
Sistemul energetic	R_s	(1.25)	$0,1 \cdot 0,70$	0,07
	X_s	(1.26)	$\frac{1,1 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{250}$	0,70
LEA 20 kV	R_{l_1}	(1.31)	$630 \cdot 5\left(\frac{0,4}{20}\right)^2$	1,26
	X_{l_1}	(1.32)	$400 \cdot 5\left(\frac{0,4}{20}\right)^2$	0,80
Trafo	R_T	(1.27) ; tab. 1.17	$\frac{2 \cdot 0,4^2 \cdot 10^4}{160}$	20
	X_T	(1.28) ; $u_x = \sqrt{4^2-2^2}$	$\frac{3,46 \cdot 0,4^2 \cdot 10^4}{160}$	34,60
Cablu 0,4kV	R_{l_2}	tab. 1.18	$\frac{17,9 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 0,08}{95}$	15,07
	X_{l_2}	tab. 1.18	$75 \cdot 0,08$	6

Rezistența totală: $R = 0,07 + 1,26 + \frac{20}{3} + 15,07 = 23,07$ mΩ.

Reactanța totală: $X = 0,70 + 0,8 + \frac{34,6}{3} + 6 = 19,03$ mΩ.

Scanned with OKEN Scanner

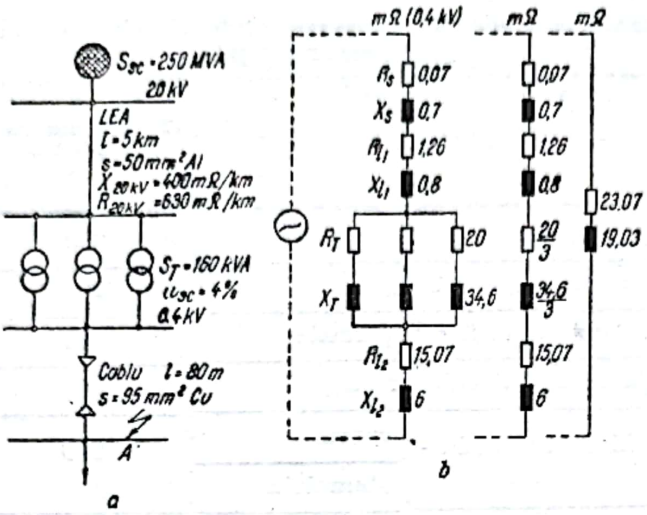


Fig. 1.31. Schema electrică *a* și de calcul *b* a curenților de scurtcircuit.

Impedanța totală

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{23{,}07^2 + 19{,}03^2} = 29{,}9 \text{ m}\Omega. \tag{1.34}$$

Curentul de scurtcircuit trifazat (rel. 1.22) este

$$I_{sc_3} = \frac{0{,}4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 29{,}9} = 7{,}8 \text{ kA}. \tag{1.35}$$

Raportul dintre rezistența și reactanța totală fiind 23,07 / 19,03 = 1,20 coeficientul curentului de șoc (fig. 1.30) este $k = 1{,}06$.

Curentul de șoc (rel. 1.33) este

$$I_ș = 1{,}06 \cdot \sqrt{2} \cdot 7{,}8 = 1{,}54 \text{ kA}.$$

1.5.4. Stabilitatea termică și dinamică la scurtcircuit

Stabilitatea termică. Prin stabilitatea termică la scurtcircuit a elementelor rețelei se înțelege încălzirea acestora pînă la valorile maxime admisibile în regim de scurtcircuit — tabela 1.20. Condiția de stabilitate termică pentru instalațiile de joasă tensiune este

$$I_{lt}^2 \cdot t_{lt} \geq I_{sc}^2 \cdot t_{sc}, \tag{1.36}$$

în care: I_{lt} (curentul limită termic) este valoarea eficace constantă a curentului de scurtcircuit care poate fi suportat de aparat sau de conductor timp de t_{lt} secunde (deobicei 15, sau 10 s);

Tabela 1.20

Valorile temperaturii maxime admisibile și a coeficientului C la încălzirea conductelor, în regim de scurtcircuit [25]

Tipul și materialul conductelor		Temperatura maximă admisibilă [°C]	Coeficientul C
Bare din cupru		200	165
Bare din aluminiu		200	90
Bare din oțel (fără legătură directă cu aparatele)		400	66
Bare din oțel (cu legătură directă cu aparatele)		300	60
Cabluri cu izolație de hîrtie cu conducte de	cupru	200	145
	aluminiu		98
Cabluri cu izolație din cauciuc sau PVC, cu conducte de	cupru	150	122
	aluminiu		83
Cabluri și conductoare cu izolație de polietilenă cu conducte de	cupru	120	104
	aluminiu		70

I_{sc} — valoarea eficace a curentului de scurtcircuit de durată;
t_{sc} — durata scurtcircuitului egală cu timpul de acționare al aparatelor de protecție, în s.

Pentru contactoare și întreruptoare automate se indică în cataloage valoarea curentului de rupere I_r pe care aceste aparate îl pot întrerupe în cazul scurtcircuitului sau a curentului limită termic I_{lt}, pe care îl pot suporta timp de t_{lt} secunde. Cum timpul de întrerupere t_{sc} al scurtcircuitelor prin relee electromagnetice este în general de ordinul 0,05 — 0,1 s, se poate considera că întreruptorul automat prezintă o stabilitate termică suficientă dacă se îndeplinesc condițiile

$$I_r \geqslant I_{sc} \tag{1.37}$$

și

$$I_{lt} \geqslant \frac{I_{sc}\sqrt{0,1}}{\sqrt{t_{lt}}} = 0,316\frac{I_{sc}}{\sqrt{t_{lt}}}. \tag{1.38}$$

Deoarece rețelele electrice de joasă tensiune sînt prevăzute cu siguranțe fuzibile avînd un efect limitator al curentului de scurtcircuit, dintre conductoare se verifică numai barele și cablurile neprotejate prin siguranțe fuzibile, a căror secțiune s trebuie să îndeplinească condiția [21]:

$$s \geqslant I_{sc}\frac{\sqrt{t_{sc}}}{C} \quad [\text{mm}^2], \tag{1.39}$$

în care: I_{sc} este în A, t_{sc} în s, iar C este un coeficient care depinde de materialul conductelor (tab. 1.20).

Stabilitatea dinamică. Prin stabilitatea dinamică la scurtcircuit a elementelor rețelei se înțelege curentul maxim de șoc pe care acestea îl pot suporta din punct de vedere al rezistenței mecanice.

Pentru întreruptoare automate se indică în cataloage curentul limită dinamic I_{ld}, stabilitatea dinamică fiind realizată dacă

$$I_{ld} > I_{ș}. \tag{1.40}$$

În cazul barelor se verifică rezistența mecanică a acestora la încovoierea pe care tind să o producă forțele electrodinamice, cu relația

$$\sigma < \sigma_a, \tag{1.41}$$

unde σ ste rezistența la încovoiere produsă de curentul de șoc iar σ_a — rezistența admisibilă la încovoiere [8].

1.5.5. Protecția instalațiilor electrice de joasă tensiune

Instalațiile de joasă tensiune trebuie protejate împotriva suprasarcinilor și scurtcircuitelor prin siguranțe fuzibile, contactoare și întreruptoare automate prevăzute cu relee termice și relee electromagnetice (maximale) cu acționare instantanee sau temporizată; întreruptoarele automate sînt prevăzute și cu relee de tensiune minimă sau nulă care protejează contra revenirii tensiunii.

Aparatele de protecție se prevăd:

— la plecările din tablourile de distribuție;

— la intrarea în tablouri prevăzute cu peste cinci circuite sau avînd puterea instalată peste 8 kW;

— la ramificațiile spre receptoare individuale, făcînd excepție ramificațiile receptoarelor de mică putere (corpuri de iluminat, aparate electrocasnice etc.), a căror coloană comună este asigurată la plecarea din tablou cu maximum 15 A la 380/220 V și cu 20 A la 210/127 V;

— în toate punctele în care secțiunea coloanei descrește, exceptînd cazurile cînd siguranțele precedente asigură secțiunea cea mai mică a ramificației;

— pe nulul de lucru al circuitelor monofazate în instalațiile deservite de personal necalificat (locuințe etc.).

Se interzice montarea aparatelor de protecție:

— pe conductorul utilizat ca nul de lucru în circuitele trifazate cu patru conductoare;

— pe conductoarele instalației de protecție (prin legare la nul, la pămînt etc.).

Caracteristicile de protecție $I = f(t)$ ale conductoarelor, motoarelor electrice și ale aparatelor de protecție sînt date în figura 1.32.

Siguranțele fuzibile rapide sînt indicate pentru protecția instalațiilor în care suprasarcinile sînt puțin probabile, ca de exemplu în cazul instalațiilor de iluminat.

Siguranțele fuzibile lente se folosesc pentru protecția împotriva scurtcircuitelor a motoarelor electrice, transformatoarelor și condensatoarelor.

Scanned with OKEN Scanner

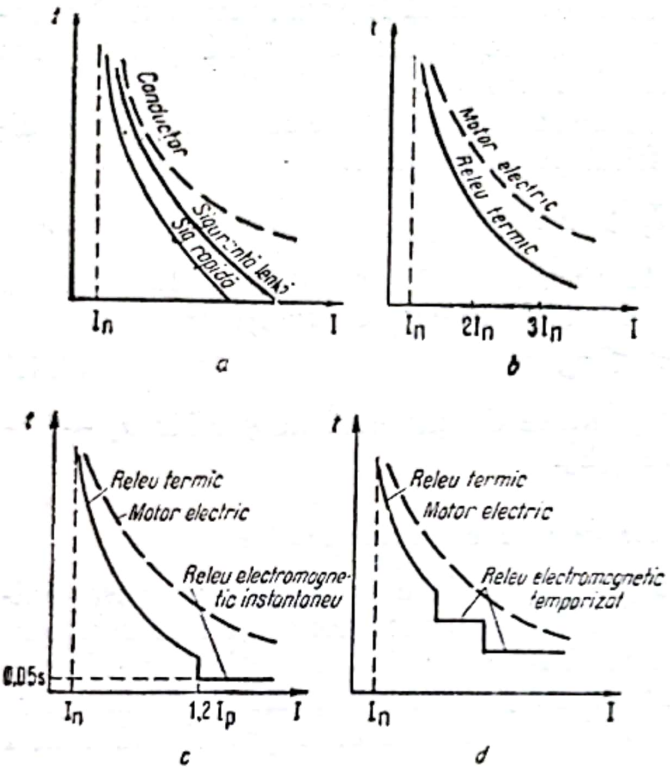


Fig. 1.32. Caracteristici de protecţie:
a — siguranţe fuzibile; *b* — relee termice; *c* — relee termice şi electromagnetice cu acţionare instantanee; *d* — relee termice şi electromagnetice cu acţionare temporizată.

Releele termice protejează coloanele şi receptoarele împotriva suprasarcinilor, curentul de acţionare I_{rt} reglîndu-se la valoarea

$$I_{rt} = (1{,}05 \ldots 1{,}2) I_c, \quad (1.42)$$

în care I_c este curentul cerut.

Releele electromagnetice se utilizează la protecţia contra scurtcircuitelor, curentul de acţionare I_{re} alegîndu-se pentru a respecta condiţia

$$I_{re} \leqslant 4{,}5 \; I_a \quad (1.43)$$

în cazul protecţiei coloanelor avînd curentul maxim admisibil I_a în regim permanent, sau

$$I_{re} \geqslant 1{,}2 \; I_p \quad (1.44)$$

în cazul protecţiei motoarelor electrice avînd curentul de pornire I_p.

Îmbinînd proprietăţile diferitelor aparate de protecţie se pot obţine caracteristici de protecţie deosebit de favorabile (fig. 1.32, *c* şi *d*).

În reţelele de distribuţie conţinînd un număr mare de aparate de protecţie se impune asigurarea selectivităţii protecţiei, adică separarea numai a elementului avariat al reţelei, restul receptoarelor continuînd să fie alimentate.

Funcţionarea selectivă a protecţiei se obţine prin coordonarea judicioasă a caracteristicilor de protecţie; pentru aceasta se trasează caracteristicile de protecţie şi se determină diferenţele de timp Δt între timpii de acţionare la anumite valori ale curenţilor. Selectivitatea este asigurată atunci cînd aceste diferenţe de timp au valori egale sau mai mari decît cele indicate în cazurile ce urmează.

Selectivitatea între două siguranţe fuzibile SF_1 şi SF_2 avînd curenţii nominali $I_{nf_1} < I_{nf_2}$, se obţine atunci cînd:

— caracteristicile lor de protecţie nu se intersectează, sau punctul de intersecţie se situează la o valoare a curentului mai mare decît curentul de scurtcircuit I_{sc} de la locul instalării siguranţei avînd curentul nominal cel mai mic;

— diferenţele de timp măsurate pe diagramă au valorile indicate în figura 1.33 *a*.

Scanned with OKEN Scanner

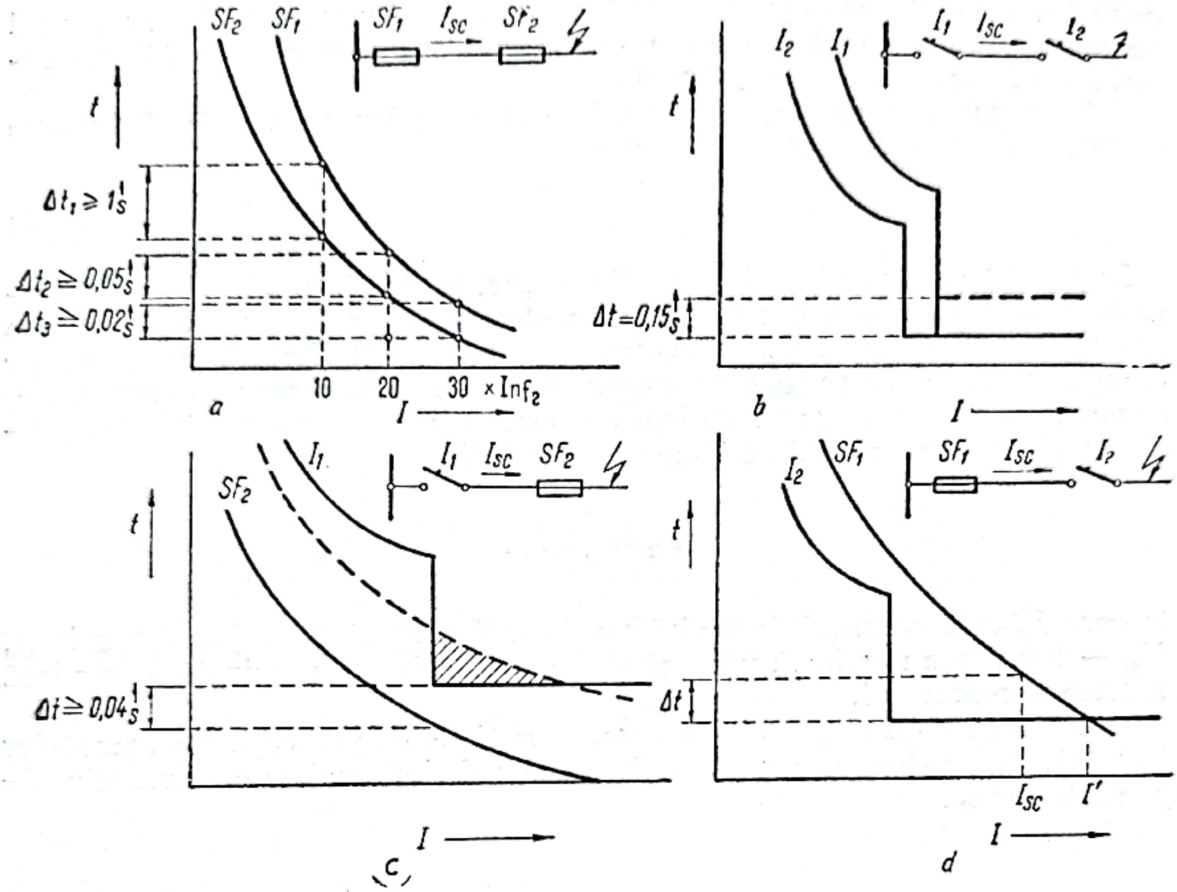


Fig. 1.33. Selectivitatea protecției unei rețele electrice:
a — două siguranțe fuzibile; *b* — două întrerupătoare automate; *c* — întreruptor automat și siguranță fuzibilă; *d* — siguranță fuzibilă și întreruptor automat.

Pentru siguranțe de același tip selectivitatea este asigurată dacă între curenții nominali ai fuzibilelor există o diferență de cel puțin două trepte.

Selectivitatea între două întreruptoare automate I_1 și I_2 având curenții nominali $I_{n1} > I_{n2}$ (fig. 1.33, *b*) este asigurată în general în domeniul curenților de suprasarcină; la curenții de scurtcircuit, unde acționează releele electromagnetice ale ambelor întreruptoare, acestea vor declanșa practic, simultan. Pentru obținerea selectivității este necesară temporizarea releelor electromagnetice ale întreruptorului I_1 (linia întreruptă), cu treapta de timp $\Delta t \geqslant 0{,}15$ s, soluție ce poate fi realizată în prezent numai cu aparataj din import.

Selectivitatea între un întreruptor automat și o singuranță fuzibilă, având curenții nominali $I_{n1} > I_{nf_1}$ (fig. 1.33, *c*), este realizată atunci cînd caracteristicile nu se intersectează și diferența de timp $\Delta t \geqslant 0{,}04$ s; dacă siguranța fuzibilă SF_2 este prea mare (linia întreruptă), apare un triunghi de neselectivitate (haşurat).

Între o siguranță fuzibilă și un întreruptor automat având curenții nominali $I_{nf_1} \geqslant I_{n2}$ (fig. 1.33, *d*) selectivitatea este asigurată dacă intersecția

celor două caracteristici se situează la un curent I' mai mare decît curentul de scurtcircuit I_{sc} după întreruptorul automat; în cazurile limită este necesar un interval de timp $\Delta t \geqslant 0{,}05$ s.

Selectivitatea între o singură fuzibilă și un releu termic tip *TSA* este asigurată dacă curenții respectă condiția

$$I_{nf} \simeq 3I_{rt}. \tag{1.45}$$

În cazul transformatoarelor de alimentare, protecția rețelei de joasă tensiune trebuie corelată din punct de vedere al selectivității, cu protecția rețelei de înaltă tensiune. Pentru aceasta caracteristicile de protecție ale aparatelor de înaltă tensiune (siguranțe fuzibile, întreruptoare automate) se vor transpune pe partea de joasă tensiune, raportînd curenții corespunzători diferiților timpi de acționare, cu relația

$$I_{jt} = \frac{U_{it}}{U_{jt}} I_{it},$$

în care I_{jt} este curentul de înaltă tensiune I_{it} raportat la joasă tensiune, U_{it} — tensiunea nominală primară și U_{jt} — tensiunea nominală secundară a transformatorului.

În modul acesta se pot analiza caracteristicile de protecție ale aparatelor instalate la tensiuni diferite, luîndu-se ca referință valoarea curentului de joasă tensiune.

1.6. ÎMBUNĂTĂȚIREA FACTORULUI DE PUTERE ÎN ÎNTREPRINDERILE INDUSTRIALE

Într-un circuit de curent alternativ factorul de putere este definit prin raportul $K = \frac{P}{S}$ între puterea activă P și puterea aparentă S.

În regim sinusoidal, în cazul unui circuit monofazat sau trifazat echilibrat, $K = \cos \varphi$, în care φ reprezintă unghiul de defazaj între tensiune și curent; în cazul unui circuit trifazat dezechilibrat.

$$K = \frac{\sum_i P_i}{\sqrt{(\sum_i P_i)^2 + (\sum_i Q_i)^2}}, \tag{1.46}$$

prin expresia $K = \cos \varphi$ definindu-se un unghi de defazaj fictiv.

Factorul de putere în regim nesinusoidal este definit de relația

$$K = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}, \tag{1.47}$$

în care D reprezintă puterea deformantă.

Scanned with OKEN Scanner

În practica industrială interesează mai mult valoarea medie a factorului de putere pentru un anumit interval de timp (zi, săptămînă, lună etc), adică

$$K_m = \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}}, \qquad (1.48)$$

în care E_a este energia activă, iar E_r — energia reactivă, energii consumate în intervalul respectiv de timp.

1.6.1. Cauzele și efectele scăderii factorului de putere

Scăderea factorului de putere este determinată de puterea reactivă și deformantă consumată de motoarele electrice asincrone, transformatoarele (în special cele de sudare), cuptoarele cu arc și cu inducție, lămpile fluorescente și liniile electrice de joasă tensiune de lungime mare.

Principalele efecte ale scăderii factorului de putere sînt:

— creșterea pierderilor de putere activă ΔP în instalațiile de producere, transport și distribuție a energiei electrice

$$\Delta P = 3I^2R = \frac{S^2}{(\sqrt{3}U)^2} 3R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R\ ; \qquad (1.49)$$

— necesitatea supradimensionării instalațiilor electrice, care rezultă din faptul că toate elementele rețelei se dimensionează pentru o anumită putere aparentă $S = \frac{P}{\cos \varphi}$;

— creșterea pierderilor de tensiune $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$;

— mărirea curentului de scurtcircuit permanent datorită supraexcitării generatoarelor care debitează pe o sarcină predominant inductivă;

— mărirea costului kilowattorei, tarifarea energiei electrice impunînd penalizări consumatorilor care funcționează cu un factor de putere mai scăzut decît cel neutral cos $\varphi = 0{,}93 - 0{,}95$ [31].

Față de cele menționate mai sus, rezultă că factorul de putere ridică probleme de primă importanță pentru economia națională, sub aspectul justei folosiri a investițiilor și a reducerii consumurilor de combustibil. Deși puterea reactivă nu se transformă în energie utilă, consumul de putere activă necesar producerii și transportului puterii reactive necesită cheltuieli suplimentare.

Îmbunătățirea (compensarea) factorului de putere se realizează prin micșorarea consumului de energie electrică reactivă cu ajutorul metodelor naturale sau prin compensarea acestei energii prin metode artificiale.

Dintre metodele naturale menționăm:

— funcționarea receptoarelor la sarcina lor nominală;

— revizia și repararea corectă a mașinilor electrice;

— utilizarea motoarelor sincrone unde acest lucru este posibil;
— limitatoare de mers în gol la receptoare, etc.

Principalele metode artificiale se bazează pe utilizarea condensatoarelor derivație sau a motoarelor sincrone ca surse de putere reactivă; în lucrările [2], [13] sînt indicate și alte metode artificiale. Alegerea metodei de compensare artificială se bazează pe un calcul tehnico-economic (§ 1.6.4).

Puterea deformantă în rețelele electrice se datorește receptoarelor care produc (redresoare comandate, cuptoare cu arc, transformatoare de sudare cu arc, bobine cu miez de fier etc.) sau amplifică (condensatoare statice și bobine de reactanță) distorsiunea armonică a curbei curentului și tensiunii în sistemul energetic. Armonicile din curba curentului produc în sistemul energetic efecte nedorite cum sînt:

— supratensiuni de rezonanță în circuitele rezonante ce se formează în rețea, afectînd îndeosebi condensatoarele derivație;
— distorsiunea tensiunii în sistemul energetic;
— creșterea pierderilor de putere în rețelele electrice;
— erori în funcționarea aparatelor de măsurat, de protecție și de comandă.

Limitarea sau micșorarea efectelor armonicilor superioare este posibilă prin utilizarea filtrelor electrice.

1.6.2. Îmbunătățirea factorului de putere cu ajutorul condensatoarelor derivație

Îmbunătățirea factorului de putere se obține prin legarea în derivație cu consumatorii de putere reactivă a condensatoarelor de forță, elemente producătoare de putere reactivă ($Q_c = \omega C U^2$, în care ω reprezintă pulsația tensiunii U de alimentare a condensatorului avînd capacitatea C).

Puterea necesară a bateriei de condensatoare Q_c este dată de relația

$$Q_c = P(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi) \quad [\mathrm{VAr}], \tag{1.50}$$

în care P reprezintă puterea activă cerută de consumatori, în W;
φ_1 — unghiul de defazaj al curentului față de tensiune la consumatorul necompensat;
φ — unghiul de defazaj la consumatorul compensat (fig. 1.34).

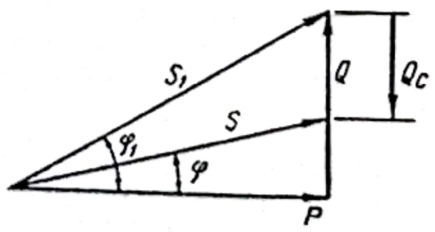


Fig. 1.34. Diagrama puterilor în cazul îmbunătățirii factorului de putere cu ajutorul condensatoarelor derivație.

Avantajele condensatoarelor sînt: pierderi active mici, simplitatea montajului, costuri mici de întreținere și posibilitate ușoară de extindere.

Dezavantajele constau în imposibilitatea variației continue a puterii reactive produse, a spațiului relativ mare ocupat și a influenței regimului deformant.

Condensatoarele fabricate la noi în țară pentru frecvența de 50 Hz sînt indicate în

tabela 1.21, conexiunile lor interioare fiind redate în figura 1.35.

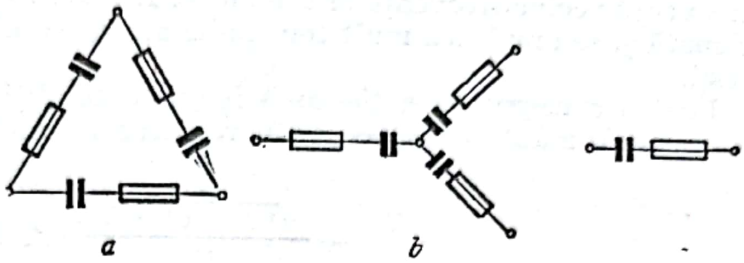


Fig. 1.35. Schemele conexiunilor interioare ale condensatoarelor:
a — trifazată în triunghi; *b* — trifazată în stea; *c* — monofazată.

Condensatoarele de joasă tensiune se leagă de preferință în triunghi, fiecare secție fiind protejată contra scurtcircuitelor interne prin siguranțe fuzibile; condensatoarele de înaltă tensiune legate în stea, rezultă din legarea în serie — paralel pe aceeași fază a mai multor unități de 1 000 V, protecția contra scurtcircuitelor interne comportînd utilizarea unor scheme speciale cu relee [13]. Bateria de condensatoare se montează în dulapuri metalice, de preferință centralizat, la tablourile de distribuție care deservesc grupe importante de receptoare inductive (fig. 1.38, *a*); soluția cu baterie individuală locală de condensatoare se preferă în cazul receptoarelor cu consum mare de putere reactivă (fig. 1.38, *b*).

Tabela 1.21

Caracteristicile condensatoarelor pentru îmbunătățirea factorului de putere [8]

Tipul condensatoarelor	Q_{nom}, kVAr	U_{nom}, kV	C_{nom}, μF	Nr. faze
CU 0,38—15—3	15	0,38	330	3
CU 0,50—15—3	15	0,50	193	3
CU 0,91/6,3—15—1	15	0,91/6,3	57,8	1
CS 0,38—15—3	15	0,38	330	3
CS 0,38—20—3	20	0,38	440	3
CS 0,50—15—3	15	0,50	193	3
CS 0,91/6,3—15—1	15	0,91/6,3	57,8	1

Condensatoare în regim deformant. Dintre toate instalațiile energetice, bateriile de condensatoare sînt cel mai mult afectate de prezența armonicilor. Admitanța lor fiind proporțională cu frecvența ($Y_n = n\omega C$, n fiind ordinul armonicii), curenții armonici ce îi parcurg pot avea valori importante chiar cînd tensiunea la borne este sinusoidală. Valoarea eficace a curentului rezultant fiind mare, produce o încălzire inadmisibilă a condensatoarelor. Această situație este agravată cînd bateria de condensatoare constituie empreună cu inductanțele rețelei un circuit rezonant derivație pentru o

Scanned with OKEN Scanner

frecvență vecină frecvențelor armonice. În acest caz bateria este supratensionată și se amplifică mult tensiunile armonice din diferitele puncte ale rețelei.

Pentru a asigura funcționarea în bune condițiuni a condensatoarelor în regim deformant, este necesară verificarea condițiilor:

$$\frac{U}{U_{nom}} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots}}{U_{nom}} \leqslant 1{,}10, \tag{1.51}$$

$$\frac{I}{I_{nom}} = \frac{f_1}{f_{nom}} \cdot \frac{U}{U_{nom}} \sqrt{1 + \Sigma(n^2 - 1)\left(\frac{U_n}{U}\right)^2} \leqslant 1{,}2, \tag{1.52}$$

$$\frac{Q_c}{Q_{c_{nom}}} = \frac{f_1}{f_{nom}} \left(\frac{U}{U_{nom}}\right)^2 \left[1 + \Sigma(n - 1)\left(\frac{U_n}{U}\right)^2\right] \leqslant 1{,}35, \tag{1.53}$$

în care n este ordinul armonicilor superioare (3, 5, 7, 9, ...);
U_n — valoarea eficace a armonicii de ordinul n a tensiunii;
U — valoarea eficace măsurată a tensiunii;
f_1 — frecvența fundamentală a tensiunii rețelei;
U_{nom}, I_{nom}, $Q_{c_{nom}}$ — mărimile nominale ale condensatoarelor.

Dacă aceste condiții nu sînt satisfăcute, se vor alege condensatoare cu tensiunea nominală mai ridicată $U_{nom_2} > U_{nom_1}$, puterea bateriei fiind în acest caz

$$Q_{c_{nom_2}} = Q_{c_{nom_1}} \left(\frac{U_{nom_2}}{U_{nom_1}}\right)^2. \tag{1.54}$$

Rezonanța armonică între condensatoare și rețeaua de alimentare poate să apară dacă nu este satisfăcută condiția [17]

$$Q_c \leqslant 0{,}005\, S_{sc}, \tag{1.55}$$

în care S_{sc} este puterea de scurtcircuit în punctul considerat.

Frecvența de rezonanță în cazul circuitului din figura 1.36 în care condensatorul C este legat în derivație la barele care alimentează sursa de curenți armonici (de exemplu un redresor) este

$$f = 50 \sqrt{\frac{X_c}{X_T + X_S}}. \tag{1.56}$$

Pentru limitarea sau micșorarea valorilor armonicilor din curba curentului se utilizează filtre electrice cu refulare sau cu absorbție.

Scanned with OKEN Scanner

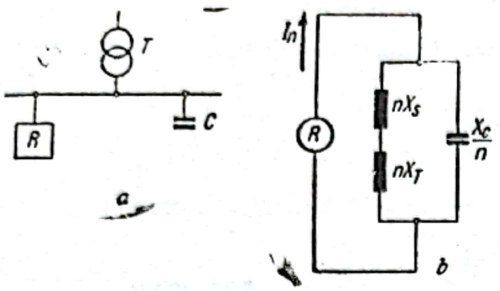


Fig. 1.36. Schema electrică de alimentare a unui redresor compensat printr-o baterie de condensatoare derivație:

a — schema monofilară; *b* — schema electrică echivalentă pentru armonicile superioare generate de redresorul *R*. X_s — reactanța sistemului; X_T — reactanța transformatorului; I_n — armonica de curent de ordinul *n* a curentului.

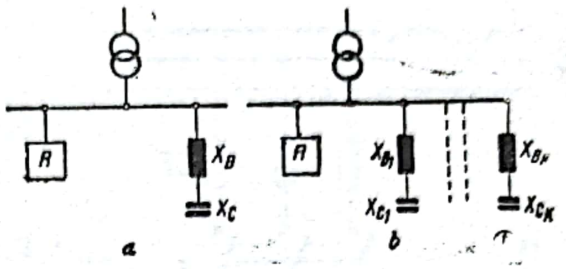


Fig. 1.37. Schemele electrice pentru limitarea efectelor armonicilor superioare:

a — bobină de dezacordare; *b* — filtre electrice.

Filtrul cu refulare este realizat prin conectarea în serie cu condensatoarele a unei bobine de dezacordare X_B (fig. 1.37, *a*) a cărei reactanță

$$X_B = 1{,}5\frac{X_c}{n_{min}^2} \tag{1.57}$$

dă circuitului serie $X_B - X_C$ un caracter inductiv pentru armonicile de ordin mai mare decît n_{min}; bobina de dezacordare are și rolul de a reduce curenții de conectare ai condensatoarelor (fig. 1.38, *c*).

Filtrele cu absorbție sînt formate din bobine de reactanță și condensatoare (fig. 1.37, *b*), avînd rolul de a scurtcircuita armonicile pentru care sînt acordate. Reactanța bobinei filtrului de armonică *k*

$$X_{B_k} = \frac{U^2}{k^2 Q_{c\,k}} = \frac{X_{ck}}{k^2} \tag{1.58}$$

Q_{ck} fiind puterea bateriei din filtrul respectiv, determinată pe baza unui calcul tehnico-economic [4].

Schemele de montaj ale condensatoarelor (fig. 1.38). Bateriile de condensatoare se protejează contra scurtcircuitelor exterioare prin:

a) Siguranțe fuzibile lente avînd curentul nominal

$$I_{nf} = 1{,}4\ I_{cnom} \tag{1.59}$$

la conectarea în trepte a condensatoarelor sau

$$I_{nf} = 1{,}6\ I_{cnom} \tag{1.60}$$

la conectarea fără trepte; I_{cnom} este curentul nominal al bateriei.

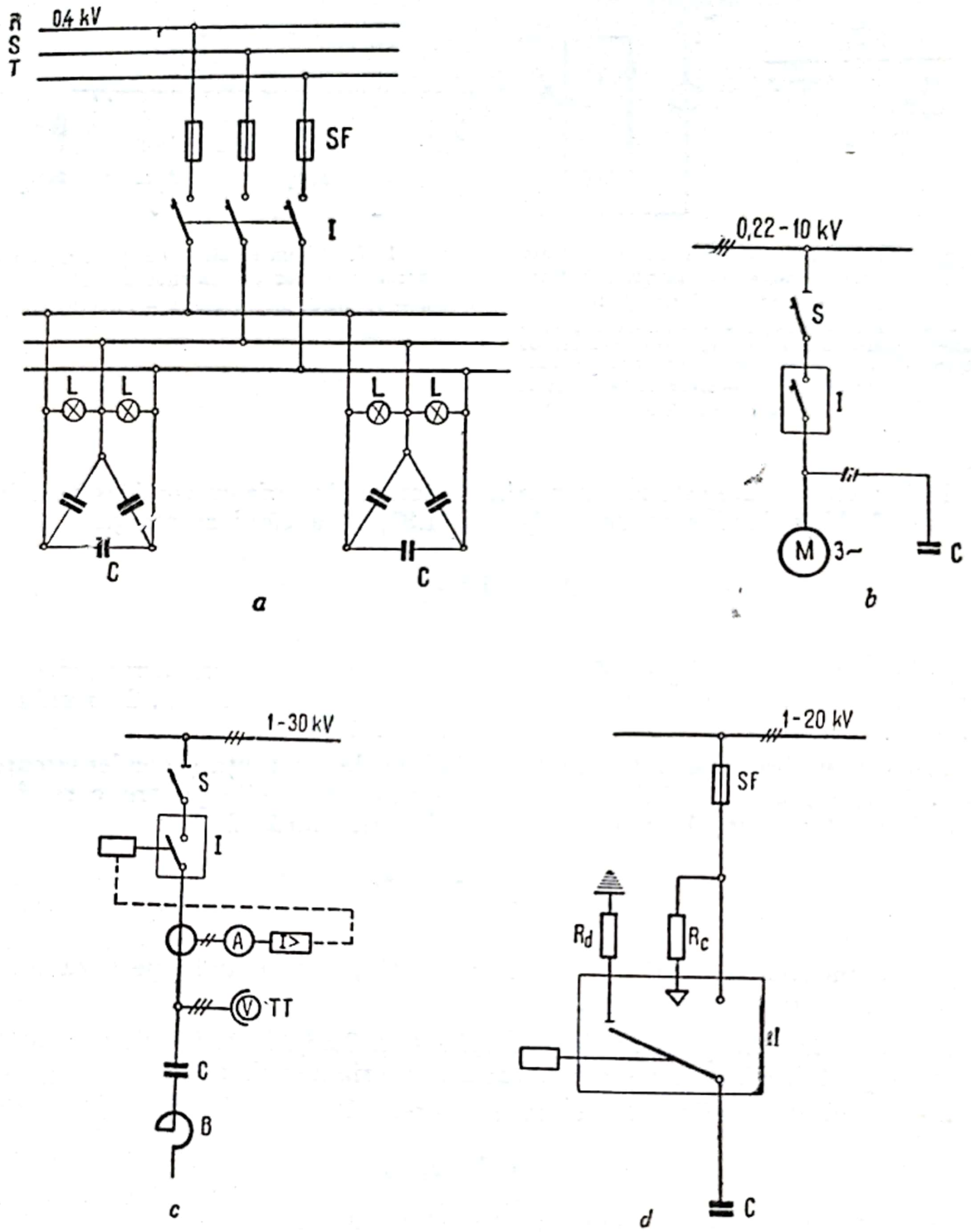


Fig. 1.38. Schemele de montaj ale condensatoarelor:

a — compensare centralizată în joasă tensiune; *b* — compensare individuală; *c* — compensare centralizată în înaltă tensiune; *d* — întreruptor special pentru baterii de condensatoare. *I* — întreruptor automat; *SF* — siguranță fuzibilă; *S* — separator; *L* — lampă cu incandescență; *B* — bobină de reactanță; *TT* — transformatoare de tensiune conectate în V; *C* — baterie de condensatoare; *I>* — releu de curent maximal.

Scanned with OKEN Scanner

b) Întreruptoare automate (de preferință în aer) avînd curentul nominal

$$I_n \geqslant 1{,}2\ I_{cnom}\,, \tag{1.61}$$

releele termice fiind reglate la

$$I_{rt} = 1{,}3\ I_{cnom}\,, \tag{1.62}$$

iar releele electromagnetice la

$$I_{re} = (4\ \ldots\ 8)\ I_{cnom}\,. \tag{1.63}$$

Pentru reducerea curentului de conectare al bateriei se introduc bobine de reactanță în serie cu condensatoarele (fig. 1.37 și 1.38, *c*) sau se utilizează întreruptoare speciale care înaintea conectării, introduc un rezistor R_c în circuitul bateriei (fig. 1.38, *d*).

În momentul deconectării unei baterii, condensatoarele rămîn încărcate cu o sarcină electrică importantă; din această cauză între bornele condensatoarelor se menține o tensiune care poate constitui un pericol pentru personalul de exploatare. Asigurarea securității deservirii impune reducerea tensiunii la bornele condensatoarelor deconectate de la rețea, la o valoare sub 24 V, în timp de un minut după deconectare. Calculul rezistorului de descărcare necesar este dat în lucrarea [13].

Ca rezistoare de descărcare se utilizează:

— lămpi electrice cu incandescență sau rezistoare, în cazul bateriilor de condensatoare de joasă tensiune (fig. 1.38, *a*):

— înfășurările motoarelor electrice compensate individual (fig. 1.38, *b*);

— transformatoare de tensiune conectate în V, în cazul condensatoarelor de înaltă tensiune (fig. 1.38, *c*);

— rezistorul de descărcare R_d al întreruptoarelor speciale pentru bateriile de condensatoare (fig. 1.38, *d*).

Pe cele trei faze ale circuitului de alimentare a bateriei se montează cîte un ampermetru, pentru ca din diferența indicațiilor acestora să se detecteze defectarea condensatoarelor.

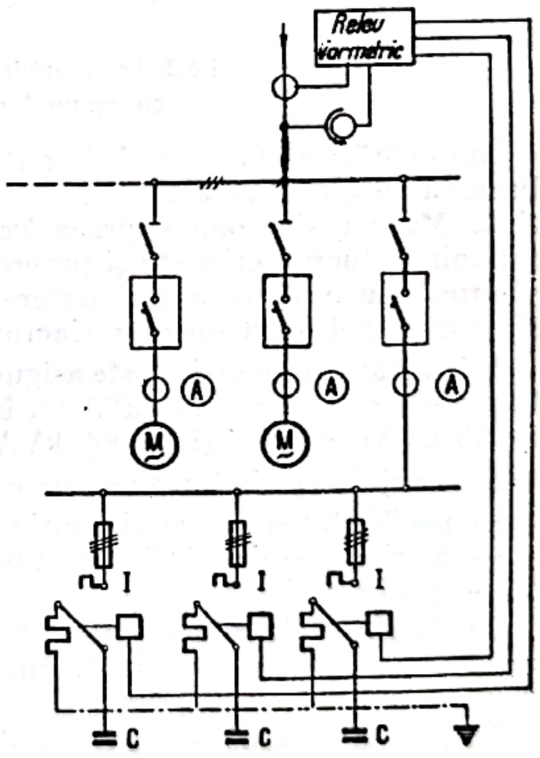


Fig. 1.39. Reglarea automată a puterii bateriei de condensatoare printr-un releu varmetric.

În cazuri speciale, pe lîngă protecțiile contra scurtcircuitelor exterioare și interioare se prevăd și protecții contra supratensiunilor, a punerilor la pămînt sau a creșterii temperaturii mediului ambiant.

Reglarea puterii bateriei de condensatoare. Absorbția de putere reactivă variază în cursul zilei în limite destul de largi. Dacă puterea bateriei de condensatoare instalate este mai mare decît puterea reactivă minimă absorbită, trebuie prevăzut reglajul puterii bateriei, pentru ca rețeaua să nu fie supracompensată în aceste perioade. Supracompensarea rețelei poate să provoace o creștere a tensiunii la bornele transformatoarelor și deformarea undei de tensiune, cu toate efectele dăunătoare menționate anterior.

Bateriile de condensatoare se împart în trepte care se conectează separat, manual sau automat. Comanda automată se realizează printr-un mecanism de ceasornic cu contacte electrice, prin relee de tensiune sau printr-un releu varmetric (fig. 1.39).

I.P.A — București a construit o instalație automată formată din:

— două traductoare care produc două tensiuni, una în fază cu tensiunea rețelei, iar cealaltă în fază cu curentul acesteia;

— un echipament Unilog, care obține defazajul între cele două semnale, îl compară cu limitele maximă și minimă admisă, iar în funcție de rezultatul obținut, dă comenzi unui distribuitor pentru introducerea sau scoaterea treptelor bateriei de condensatoare.

1.6.3. Îmbunătățirea factorului de putere cu ajutorul motoarelor sincrone

Îmbunătățirea factorului de putere prin folosirea motoarelor sincrone se bazează pe faptul că acestea în regim de supraexcitație produc putere reactivă. Mașina sincronă supraexcitată produce putere mecanică, necesară mașinii de lucru acționate și putere electrică reactivă, funcționînd ca motor sincron, sau produce numai putere electrică reactivă, funcționînd ca motor sincron în gol (compensator sincron).

Eficacitatea economică este asigurată în cazul utilizării motoarelor sincrone la puteri ce depășesc 100 kW, iar în cazul compensatoarelor sincrone, peste 5 000 kVAr la 6 kV și 10 000 kVAr la 10 kV.

Avantajele mașinilor sincrone constau în:

— posibilitatea variației continue a puterii reactive produse;
— mărirea stabilității de funcționare a rețelei;
— spațiul redus ocupat.

Ca dezavantaje se menționează: necesitatea aparatajului special pentru pornire și consumul propriu de putere activă mult mai ridicat decît în cazul condensatoarelor.

În cele ce urmează se va determina puterea aparentă a motorului sincron supraexcitat. Notăm cu:

P_1, Q_1, $\cos \varphi_1$ — puterea medie activă, reactivă și factorul de putere al instalației necompensate;

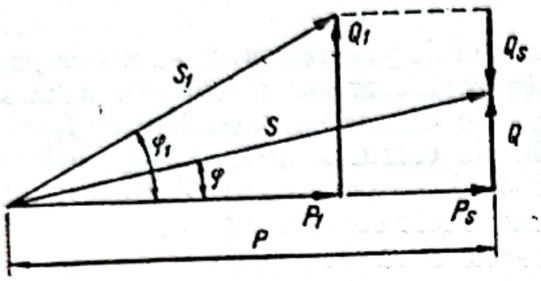


Fig. 1.40. Diagrama puterilor în cazul îmbunătățirii factorului de putere cu ajutorul motoarelor sincrone supraexcitate.

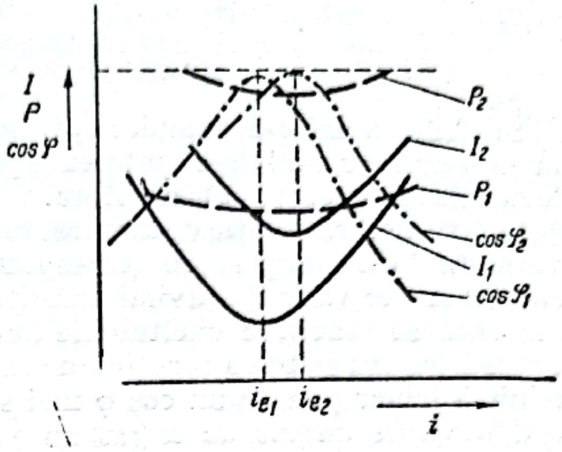


Fig. 1.41. Curbele în V ale motorului sincron.

P_S — puterea activă a motorului sincron, cerută de la rețea;
Q_S — puterea reactivă a motorului sincron, furnizată rețelei;
P, Q, cos φ — puterea activă, reactivă și factorul de putere al instalației, după compensare (fig. 1.40).

Puterea activă totală absorbită de la rețea după compensare va fi

$$P = P_1 + P_S, \tag{1.64}$$

iar puterea reactivă

$$Q = Q_1 - Q_S. \tag{1.65}$$

Factorul de putere după compensare este deci

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{Q_1 - Q_S}{P_1 + P_S}, \tag{1.66}$$

de unde

$$Q_S = Q_1 - (P_1 + P_s) \cdot \operatorname{tg}\varphi. \tag{1.67}$$

Puterea aparentă a motorului sincron este

$$S_s = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2}. \tag{1.68}$$

Motorul sincron trebuie să funcționeze supraexcitat, curentul de excitație i_e, având valoarea corespunzătoare factorului de putere

$$\cos\varphi_s = \frac{P_s}{S_s}, \tag{1.69}$$

obținîndu-se de pe curba în V corespunzătoare (fig. 1.41).

Pornirea motoarelor sincrone se face cu ajutorul unui autotransformator sau al unui motor asincron de lansare.

1.6.4. Eficiența economică a îmbunătățirii factorului de putere

Studiile tehnico-economice privind îmbunătățirea factorului de putere la consumator stabilesc puterea optimă a surselor de putere reactivă și locul de amplasare al acestora.

Pentru fiecare soluție de amplasare a sursei de putere reactivă, se compară varianta fără compensare (corespunzătoare factorului de putere natural) cu mai multe variante, avînd diferite grade de compensare. Pentru fiecare variantă se stabilesc cheltuielile anuale de calcul Z (rel. 1.70), varianta optimă pentru puterea reactivă a sursei fiind cea pentru care Z are valoarea minimă (chiar pentru un cos φ mai scăzut decît cos φ neutral).

Cheltuielile anuale de calcul au valoarea dată de relația

$$Z = 0{,}1\, I + C \ \text{[lei]}, \tag{1.70}$$

în care I reprezintă investițiile totale, în lei, iar C — cheltuielile anuale totale, în lei.

Investițiile totale cuprind:

— investiția efectivă pentru realizarea instalației de compensare de putere Q_c[kVAr]:

$$I_{ef} = aQ_c \ \text{[lei]}, \tag{1.71}$$

a fiind costul specific al instalației de compensare, în lei /kVAr(225...260 lei/kVAr la condensatoare de 0,4 kV și 200 lei/kVAr la condensatoare de 6 kV);

— investițiile conexe pentru deschideri de mine necesare extragerii combustibilului consumat în plus:

$$I_m = \delta \cdot \Delta E_{tot} \ \text{[lei]}, \tag{1.72}$$

$\delta = 0{,}42$ lei an/kWh fiind investiția specifică în deschideri de mine, iar ΔE_{tot} — pierderea totală de energie activă datorită circulației energiei reactive, în kWh/an;

— investițiile conexe pentru instalații suplimentare în centrale electrice, necesare acoperirii pierderilor de putere activă ΔP_{tot} [kW] cauzate de circulația puterii reactive, date de relația:

$$I_{CE} = \gamma \cdot \Delta P_{tot} \ \text{[lei]}, \tag{1.73}$$

în care $\gamma = 2\,700$ lei/kW reprezintă costul unui kilowatt instalat în centralele sistemului energetic.

Cheltuielile anuale totale cuprind:

— cheltuielile anuale efective date de relația

$$C_{ef} = \beta \cdot I_{ef} \ \text{[lei]}, \tag{1.74}$$

în care $\beta = 0{,}11$ este un coeficient pentru amortizarea și întreținerea instalației de compensare;

Scanned with OKEN Scanner

— cheltuielile anuale suplimentare corespunzătoare energiei active ΔE_{tot} pierdute în instalațiile consumatorului și în sistemul energetic:

$$C_E = \alpha \cdot \Delta E_{tot} \text{ [lei]}, \tag{1.75}$$

$\alpha = 0{,}20$ lei /kWh fiind prețul de cost al energiei electrice.

Pierderile de putere și energie activă, datorate circulației puterii reactive, se calculează pentru puterea reactivă a consumatorului la ora cînd are loc vîrful său de consum de putere activă.

Pierderea totală de putere activă ΔP_{tot} cuprinde:

— pierderea de putere în transformatoare

$$\Delta P_T = \frac{R_T \cdot Q_T^2}{10^3 \cdot U^2} \text{ [kW]}, \tag{1.76}$$

în care: R_T este rezistența echivalentă a unei faze a transformatorului în Ω;
Q_T — puterea reactivă care circulă prin transformator, în kVAr;
U — tensiunea de bază, în kV.

— pierderea de putere în linie

$$\Delta P_L = \frac{R_L \cdot Q_L^2}{10^3 \cdot U^2} \text{ [kW]}, \tag{1.77}$$

în care: R_L este rezistența pe fază a liniei, în Ω;
Q_L — puterea reactivă care circulă prin linie, în kVAr.

— pierderea de putere în instalația de compensare avînd puterea Q_C

$$\Delta P_C = p_c \cdot Q_C \text{ [kW]}, \tag{1.78}$$

în care p_c este pierderea de putere specifică (în kW/kVAr) — pentru condensatoarele de joasă tensiune se ia $p_c \simeq 0{,}005$ kW/kVAr;

— pierderea de putere în sistemul energetic

$$\Delta P_{sist} = \Delta P_S \cdot Q_{sist} \text{ [kW]}, \tag{1.79}$$

în care ΔP_S (în kW/kVAr) reprezintă reducerea medie a pierderilor de putere activă în sistem, prin compensarea unui kVAr pe barele de alimentare ale consumatorului (tab. 1.22);

Q_{sist} — puterea reactivă absorbită din sistemul energetic, în kVAr.

Pierderea totală de energie activă ΔE_{tot} cuprinde:

— pierderea de energie în transformatoare și în linie

$$\Delta E_T = \tau \cdot \Delta P_T \text{ [kWh/an]}$$

și

$$\Delta E_L = \tau \cdot \Delta P_L \text{ [kWh/an]}, \tag{1.80}$$

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.22

Valorile coeficienților de reducere a pierderilor de putere (ΔP_s) și energia (ΔE_s) activă în sistem [32].

Tensiunea de alimentare a consumatorului, kV	ΔP_s, kW/kVAr	ΔE_s, kWh/kVAr-an
110	0,025	100
25—60	0,030	115
6—20 (direct din 110 kV)	0,030	120
6—20 (dublă transformare)	0,045	145
6—10 (centrale)	0,030	120
joasă tensiune	0,060	170

Observații

1. Dacă sarcina absorbită din sistem la vîrful de seară este mai mică sau egală cu 50% din sarcina maximă absorbită la alte ore din zi, valorile lui ΔP_s din tabel se diminuează cu 85%.
2. Valorile lui ΔE_s din tabel sînt afectate de un coeficient $k = 0{,}96 \ldots 1{,}15$, în funcție de tensiunea de alimentare și numărul de schimburi de muncă.

în care τ (în h/an) este timpul anual de pierderi maxime determinat din figura 1.42 în funcție de timpul de utilizare a puterii maxime

$$T_{[h]} = \frac{\text{consumul anual de energie activă } E_a \text{ [kWh]}}{\text{puterea activă maximă } P \text{ [kW]}} \tag{1.80'}$$

și a factorului de putere mediu

$$\cos \varphi_{med} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{E_r - E_{rc}}{E_a}\right)^2}}, \tag{1.80''}$$

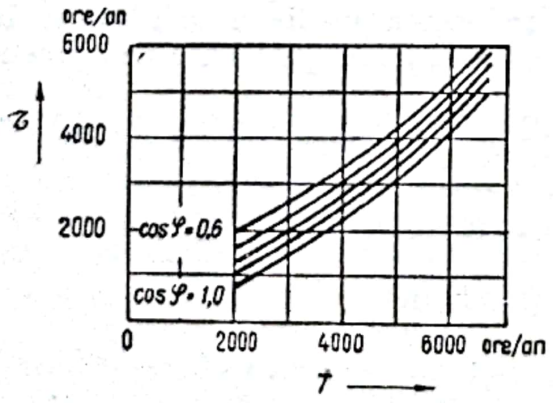


Fig. 1.42. Timpul anual de pierderi maxime.

în care E_{rc} este energia reactivă produsă de condensatoare.

— pierderea de energie în instalația de compensare

$$\Delta E_c = \Delta P_c T_c = \\ = Q_c \cdot p_c \cdot T_c \text{ [kWh/an]}, \tag{1.81}$$

în care T_c (în h/an) este timpul de funcționare al instalației de compensare. De exemplu, pentru o singură

baterie de condensatoare, la lucrul într-un schimb se poate lua $T_c = 3000$ h/an, iar la lucrul în două și trei schimburi $T_c = 5\,500$ și respectiv 7 000 ... 7 500 h/an;

— pierderea de energie în sistemul energetic

$$\Delta E_{sist} = Q_{sist} \cdot k \cdot \Delta E_S \ [\text{kWh/an}], \qquad (1.82)$$

în care ΔE_S (în kWh/kVAr -an) reprezintă reducerea medie a pierderii de energie activă în sistem prin compensarea unui kVAr pe barele de alimentare ale consumatorului, afectată de coeficientul k (tabela 1.22).

Exemplu. Să se determine valoarea optimă a bateriei de condensatoare instalată la barele de 0,4 kV ale schemei din figura 1.43.

Puterea maximă activă a consumatorului este $P = 500$ kW, iar cea reactivă $Q = 865$ kVAr (fig. 1.44). Se lucrează într-un schimb (300 zile/an) și conform diagramei de sarcină din figură se obține $E_a = 1\,566$ MWh/an, $E_r = 2\,940$ MVAr/an, $T = 1\,566 \cdot 10^3/500 = 3\,132$ ore/an (rel. 1.80'), $\cos \varphi_{natural} = 500/\sqrt{500^2 + 865^2} = 0{,}5$ (rel. 1.46), $T_c = 3\,000$ h/an.

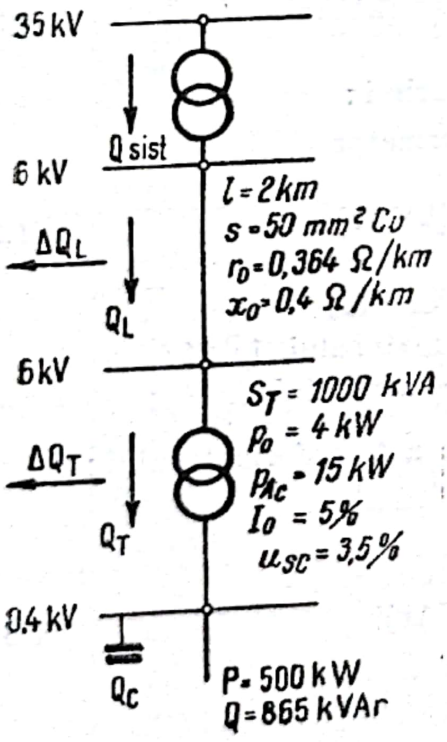


Fig. 1.43. Schema electrică de calcul pentru îmbunătățirea factorului de putere.

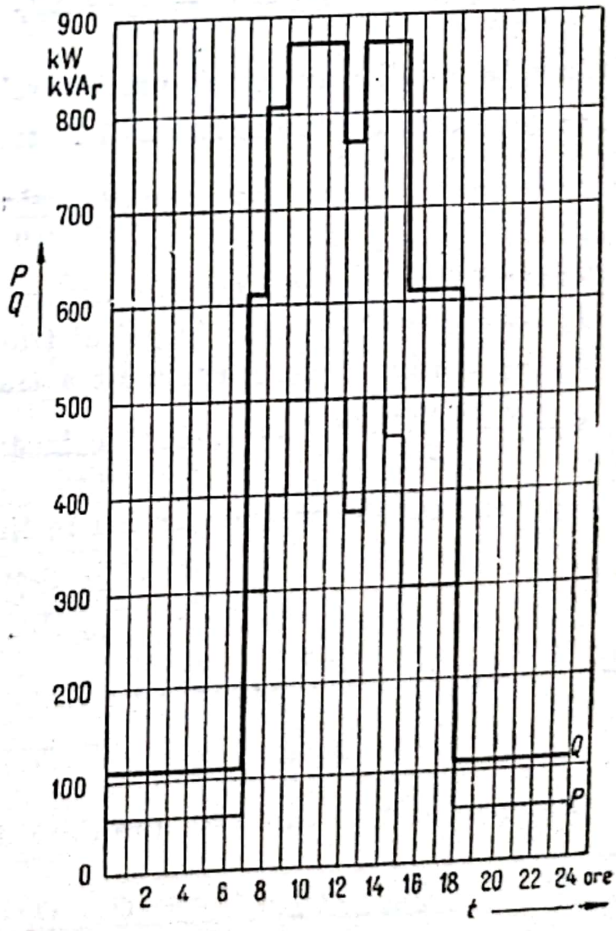


Fig. 1.44. Curbele de sarcină zilnică ale consumatorului din fig. 1.43.

Din tabela 1.22 se ia: $\Delta P_S = 0{,}15 \cdot 0{,}045 = 0{,}00675$ kW/kVAr (s-a aplicat reducerea de 85%, întrucît seara sarcina este $< 50\%$ din sarcina maximă); $\Delta E_s = 145$ kWh/kVArh-an; $k = 1{,}00$.

Se ia drept tensiune de bază $U = 6$kV.

Cu datele din figura 1.43 se calculează:

$$R_L = r_0 \cdot l = 0{,}364 \cdot 2 = 0{,}728 \ \Omega;$$

$$X_L = x_0 \cdot l = 0{,}4 \cdot 2 = 0{,}8 \ \Omega;$$

$$R_T = \frac{10^3 \cdot p_{sc} \cdot U^2}{S_T^2} = \frac{10^3 \cdot 15 \cdot 6^2}{1000^2} = 0{,}54 \ \Omega.$$

Puterea reactivă care circulă prin transformator este

$$Q_T = Q - Q_c \ [\text{kVAr}], \tag{1.83}$$

iar puterea reactivă care circulă în linie

$$Q_L = Q - Q_c + \Delta Q_T + \frac{\Delta Q_L}{2} \ [\text{kVAr}]. \tag{I.84}$$

În aceste relații s-au folosit următoarele mărimi:

— pierderea de putere reactivă în transformator

$$\Delta Q_T = S_T \frac{(I_0 + \varepsilon^2 \cdot u_{sc})}{100} \ [\text{kVAr}], \tag{1.85}$$

în care: S_T este puterea transformatorului, în kVA;

I_0 — curentul de mers în gol al transformatorului, în %;

u_{sc} — tensiunea de scurtcircuit a transformatorului, în %;

$\varepsilon = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_c)^2}}{S_T}$ — gradul de încărcare a transformatorului;

— pierderea de putere reactivă în linie

$$\Delta Q_L = \frac{X_L \cdot S_L^2}{10^3 \cdot U^2} \ [\text{kVAr}], \tag{1.86}$$

în care S_L este puterea aparentă care circulă în linie

$$S_L = \sqrt{P^2 + (Q - Q_c + \Delta Q_T)^2} \quad [\text{kVA}]. \tag{1.87}$$

Puterea reactivă care este absorbită din sistem

$$Q_{sist} = Q_L + \frac{\Delta Q_L}{2} = Q - Q_c + \Delta Q_T + \Delta Q_L \quad [\text{kVAr}]. \tag{1.88}$$

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.23

Determinarea cheltuielilor anuale de calcul pentru diferite valori ale cosφ îmbunătățit

Mărimea calculată	Relația de calcul	cos φ					
		natural 0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
tg φ	$\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi}-1}$	1,73	1,33	1,01	0,75	0,48	0,33
Q_c	$Q - P \operatorname{tg}\varphi$	0	200	360	490	625	700
$Q - Q_c = Q_T$		865	665	505	375	240	165
S	$\sqrt{P^2 + (Q-Q_c)^2}$	1000	833	710	625	555	525
ε^2	$(S/S_T)^2$	1,0	0,692	0,502	0,39	0,308	0,275
ΔQ_T	(1.85)	100	89	78	71,5	67	65
ΔQ_L	(1.86)	27	18,8	13,8	10,8	8,6	7,5
Q_L	(1.84)	978,5	763,4	589,9	451,9	311,3	233,7
Q_{sist}	(1.88)	994	771	594	456	314	236
ΔP_T	(1.76) și (1.83)	11,2	6,67	3,85	2,10	0,87	0,45
ΔP_L	(1.77)	19,8	11,7	7,00	4,10	2,00	1,10
ΔP_c	(1.78)	0	1,00	1,80	2,45	3,10	3,50
ΔP_{sist}	(1.79)	6,70	5,20	4,00	3,10	2,10	1,60
ΔP_{tot}	$\Delta P_T+\Delta P_L+$ $+\Delta P_c+\Delta P_{sist}$	37,7	24,57	16,65	11,75	8,07	6,65
E_{rc}	$\sum_i T_{c_i} Q_{c_i}$ [MVArh/an]	0	1070	1600	2030	2480	2640
$\cos\varphi_{mediu}$	(1.80″)	0,47	0,645	0,76	0,87	0,96	0,98
τ	fig. 1.42	3100	2650	2200	1800	1500	1400
ΔE_R	$\tau \cdot \Delta P_T + \tau \cdot \Delta P_L$	96000	48700	23900	11500	4300	2170
ΔE_c	(1.81)	0	5350	8000	10150	12400	13200
ΔE_{sist}	(1.82)	143500	111000	86000	66000	45500	34200
ΔE_{tot}	$\Delta E_R+\Delta E_c+\Delta E_{sist}$	239500	165050	117900	87650	62200	49570
$0{,}1\ I_{ef} + C_{ef}$	(1.71) și (1.74)	0	10500	18900	25700	32800	36700
$0{,}1\ I_m + C_E$	(1.72) și (1.75)	58000	40000	28500	21200	15100	12750
$0{,}1\ I_{CE}$	(1.73)	10150	6630	4490	3170	2180	1795
Z	(1.70)	68150	57130	51890	50070	50080	51245

Scanned with OKEN Scanner

În tabela 1.23 sînt date cheltuielile anuale de calcul pentru diferite valori ale Q_c şi deci cos φ. Se constată că cheltuielile cele mai mici sînt pentru cos $\varphi = 0{,}8$, la care $Q_c = 490$ kVAr.

Economia anuală realizată prin montarea instalaţiei de compensare optimă este

$$\Delta Z = 68\,150 - 50\,070 = 18\,080 \text{ lei.}$$

1.7. MĂSURI DE PROTECŢIE IMPOTRIVA TENSIUNILOR DE ATINGERE

Trecerea curentului electric prin corpul omenesc se datoreşte atingerii elementelor reţelei electrice care fac parte din circuitele curenţilor de lucru — atingere directă, sau a elementelor care nu fac parte din circuitele curenţilor de lucru, dar au fost puse accidental sub tensiune, datorită unor defecte ale instalaţiei electrice — atingere indirectă. Electrocutarea constă în arsuri, şocuri electrice care acţionează direct asupra inimii şi a sistemului nervos, producînd în anumite condiţii suprimarea vieţii.

Natura şi amploarea efectelor electrocutării depind de frecvenţa, intensitatea, traseul curentului prin corpul omenesc şi de durata trecerii curentului.

Frecvenţa industrială a curentului este cea mai periculoasă; curenţii de înaltă frecvenţă sînt periculoşi numai datorită arsurilor pe care le provoacă.

Intensitatea curentului reprezintă factorul fizic determinant în electrocutare; valorile maxime admisibile ale curenţilor consideraţi nepericuloşi pentru un timp mai mare de 3 secunde, sînt: 10 mA în curent alternativ şi 50 mA în curent continuu (STAS 2612—68).

Tensiunea la care este supus omul în cazul atingerilor indirecte se numeşte *tensiune de atingere*. Considerînd rezistenţa corpului omenesc de 3000 Ω se obţine valoarea maximă admisibilă a tensiunii de atingere de 65 V în curent alternativ şi 110 V în curent continuu; normativul [30] indică şi valori mai scăzute în funcţie de caracteristicile mediului ambiant.

Măsurile de protecţie sînt astfel realizate încît la atingerea elementelor reţelei electrice, curentul şi tensiunea de atingere să nu depăşească valorile limită indicate anterior.

Pentru evitarea accidentelor prin atingere directă se aplică în funcţie de condiţiile specifice, măsuri de protecţie ca:

— inaccesibilitatea tuturor elementelor instalaţiei care fac parte din circuitele curenţilor de lucru; aceasta se realizează prin izolarea electrică (de lucru), utilizarea carcaselor de protecţie, amplasarea la înălţimi inaccesibile, prevederea de îngrădiri care să nu permită apropierea persoanelor de elementele aflate sub tensiune, blocaje electrice sau mecanice, montarea instalaţiilor în încăperi speciale (categoria EE);

— izolarea suplimentară de protecţie;

— utilizarea tensiunilor reduse;

Scanned with OKEN Scanner

— folosirea mijloacelor individuale de protecţie (scule izolate, mănuşi şi cizme dielectrice, platforme izolante etc).

Pentru evitarea accidentelor prin atingere indirectă în reţelele legate la pământ se pot aplica una sau mai multe din măsurile de protecţie enumerate mai jos:

— folosirea tensiunilor reduse;
— protecţia prin legare la pământ;
— protecţia prin legare la nul;
— izolarea suplimentară de protecţie;
— separarea de protecţie;
— egalizarea sau dirijarea potenţialelor;
— deconectarea automată în cazul apariţiei unei tensiuni de atingere periculoase sau a unui curent de defect periculos.

În reţelele izolate faţă de pământ se aplică simultan următoarele măsuri de protecţie:

— protecţia prin legare la pământ;
— controlul permanent al rezistenţei de izolaţie a reţelei faţă de pământ, cu posibilităţi de semnalizare acustică şi optică în cazul unei puneri simple la pământ;
— egalizarea sau dirijarea potenţialelor;
— deconectarea rapidă a punerilor duble la pământ.

În cele ce urmează vor fi prezentate aceste măsuri de protecţie.

Izolarea suplimentară de protecţie se aplică utilajului sau amplasamentului — figura 1.45.

Separarea de protecţie constă în separarea galvanică a circuitului electric al unui singur receptor faţă de reţeaua de alimentare, prin intermediul transformatorului de separaţie (fig. 1.46), a cărui carcasă este legată la pământ.

Tensiunile reduse de 12, 24 şi 42 V se obţin de la transformatoare de protecţie avînd carcasa legată la conductorul de protecţie (fig. 1.47). Carcasele receptoarelor alimentate la tensiune redusă nu vor fi legate la conductorul de protecţie.

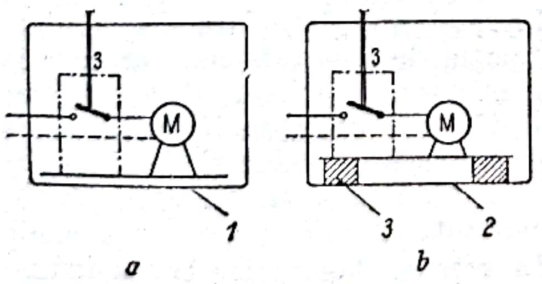


Fig. 1.45. Izolarea suplimentară de protecţie aplicată utilajului *a* sau amplasamentului *b*:

1 — carcasă din material izolant; *2* — carcasă metalică; *3* — izolaţie suplimentară.

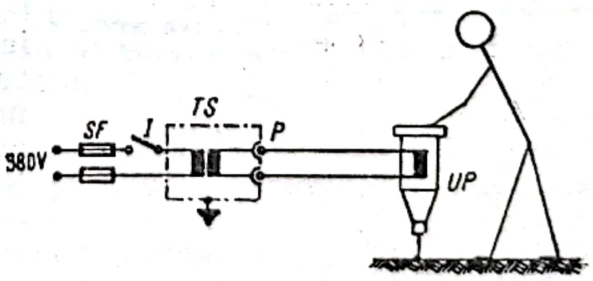


Fig. 1.46. Separarea de protecţie:

TS — transformator de separaţie; *P* — priză; *UP* — unealtă electrică portativă; *SF* — siguranţe fuzibile; *I* — întreruptor.

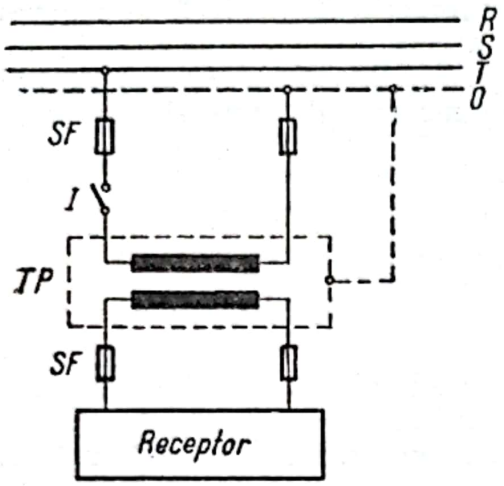


Fig. 1.47. Alimentarea la tensiune redusă: *TP* — transformator de protecţie; *I* — întreruptor; *SF* — siguranţe fuzibile.

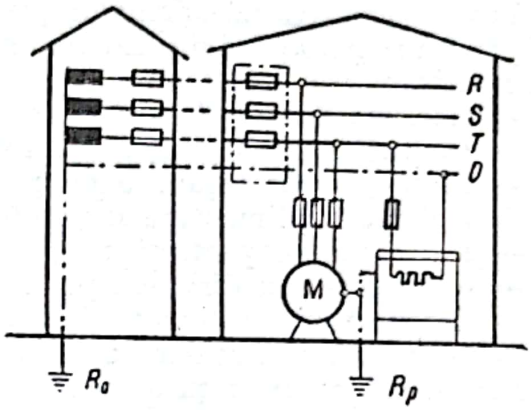


Fig. 1.48. Protecţia prin legare la pământ: R_p — rezistenţa prizei de pământ de protecţie; R_e — rezistenţa prizei de pământ de exploatare.

Protecţia prin legare la pământ [STAS 6119—68] se realizează prin legarea părţilor metalice ale instalaţiei electrice care trebuie protejată contra tensiunilor de atingere, cu elemente metalice introduse în pământ (prize de pământ) — figura 1.48. Protecţia este eficientă dacă rezistenţa prizei de pământ de protecţie nu va depăşi valoarea de 4Ω, asigurîndu-se în acest mod o tensiune de atingere sub limita maximă admisibilă.

Pentru realizarea prizelor de pământ se folosesc în primul rînd elementele naturale conductoare ale construcţiilor existente (armăturile metalice îngropate în pământ ale construcţiilor, conductele metalice ale instalaţiei de apă, armăturile metalice ale cablurilor etc. şi în al doilea rînd prizele de pământ artificiale. Acestea din urmă se execută sub forma unor contururi (centuri) închise sau deschise realizate din bandă şi electrozi-ţeavă din oţel zincat, îngropaţi în pământ (fig. 1.49), obţinîndu-se în acest mod şi egalizarea sau dirijarea potenţialelor.

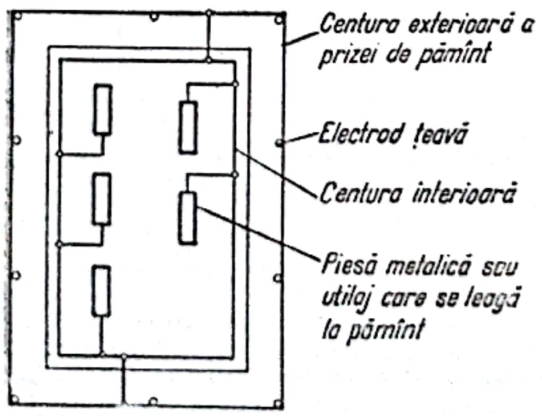


Fig. 1.49. Elementele unei prize de pământ.

În reţelele izolate faţă de pământ, instalaţia de legare la pământ constituie măsura principală de protecţie, însoţită fiind de semnalizarea punerilor simple la pământ şi de deconectarea rapidă în cazul punerilor duble la pământ.

În reţelele legate la pământ, instalaţia de legare la pământ constituie o protecţie suplimentară a instalaţiei de legare la nul.

Protecţia prin legare la nul [STAS 6616—69] se realizează prin legarea

părţilor metalice ale instalaţiei care trebuie protejată contra tensiunilor de atingere, la conductorul de nul al reţelei (fig. 1.50). În cazul apariţiei tensiunii de atingere la un utilaj (de exemplu un defect de izolaţie al unei faze), curentul de scurtcircuit monofazat care se închide prin nulul reţelei şi faza defectă, va determina topirea siguranţei fuzibile sau deconectarea întreruptorului automat aferent utilajului respectiv.

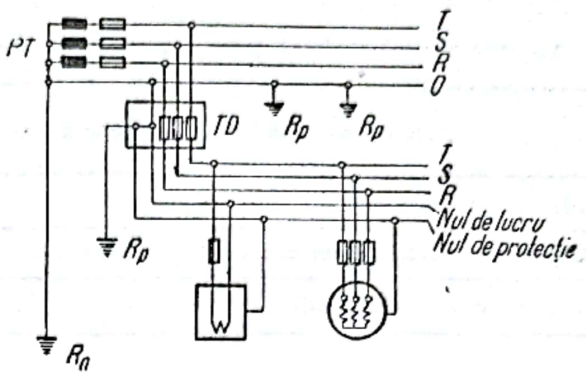


Fig. 1.50. Protecţia prin legare la nul:
PT — post de transformare; *TD* — tablou de distribuţie; R_0 — rezistenţa prizei de pămînt de exploatare; R_p — idem, de protecţie.

Condiţiile ce stau la baza proiectării şi executării unei instalaţii de legare la nul sînt următoarele:

— secţiunile conductoarelor de nul, între sursa de alimentare şi receptor, trebuie astfel dimensionate încît curentul de scurtcircuit monofazat

$$I_{sc_1} = \frac{U_f}{Z_f + Z_n + Z_T} \geqslant kI_n, \qquad (1.89)$$

în care: U_f este tensiunea pe fază a reţelei;

Z_f, Z_n, Z_p — impedanţa fazei, nulului, respectiv a transformatorului;

I_n — curentul nominal al celei mai apropiate siguranţe fuzibile sau curentul de reglaj al releului electromagnetic al întreruptorului;

k — coeficient avînd valorile indicate în tabela 1.24;

— conductorul de nul de protecţie va fi separat de conductorul de nul de lucru, începînd de la ultimul tablou de distribuţie în sensul transportului de energie;

— conductorul de nul de protecţie nu va fi prevăzut cu siguranţe fuzibile sau întreruptoare pentru a se evita pericolul întreruperii circuitului;

— reţeaua conductoarelor de nul se va lega în mai multe puncte la pămînt, prin prize avînd $R_p \leqslant 4\ \Omega$.

Protecţia prin deconectarea automată a sectorului defect utilizează relee de tensiune care acţionează asupra întreruptorului automat la apariţia unei tensiuni de atingere periculoase (PATA) — figura 1.51 sau a unor curenţi de defect periculoşi (PACD).

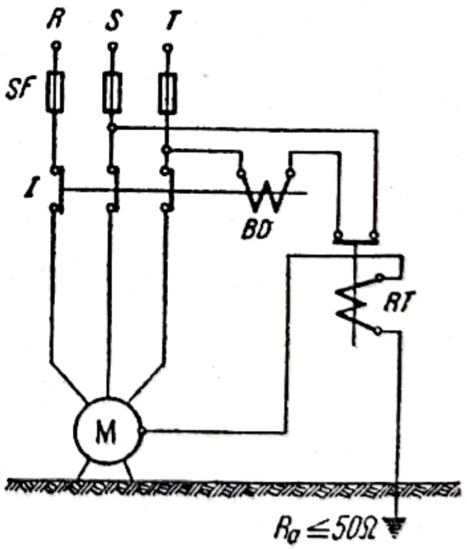


Fig. 1.51. Protecţia prin deconectarea automată a sectorului defect la apariţia unor tensiuni de atingere periculoase:
RT — releu de tensiune; *BD* — bobina de declanşare a întreruptorului *I*; *SF* — siguranţe fuzibile.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 1.24

Valorile coeficientului k pentru verificarea secțiunii conductorului de nul de protecție [30]

Tipul siguranței fuzibile sau întreruptorului automat	Curentul, A	k
Siguranțe unipolare cu filet, rapide	$\leqslant 50$	3,5
Siguranțe cu mare putere de rupere, rapide	$\geqslant 63$	5
Întreruptoare automate	—	1,25

Această protecție se folosește ca măsură suplimentară în cazurile în care protecția prin legare la nul sau la pământ nu prezintă siguranța realizării unei tensiuni de atingere sub valoarea maximă admisă.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 2

ILUMINATUL ELECTRIC

Generalități. Lumina condiționează în mare măsură activitatea omului. Iluminatul electric de nivel ridicat contribuie la mărirea productivității muncii, la evitarea erorilor, la reducerea numărului de accidente.

Instalațiile de iluminat electric trebuie să realizeze un anumit nivel de iluminare, concomitent cu îndeplinirea unor condiții de calitate datorate caracterului subiectiv (legat de activitatea vizuală a omului) al iluminatului.

Mărirea nivelurilor de iluminare este însoțită de creșterea puterilor unitare ale surselor de lumină electrică, de adoptarea unor corpuri de iluminat care să realizeze o distribuție adecvată a fluxului luminos în spațiu. Tendința actuală în tehnica iluminatului electric o reprezintă trecerea de la proiectarea instalațiilor de iluminat pe bază de iluminări, la dimensionarea pe bază de luminanțe, mărimi care influențează direct ochiul omenesc. În instalațiile noi de iluminat se studiază și compoziția spectrală a radiației luminoase legată de culorile suprafețelor și obiectelor iluminate, avîndu-se în vedere influența psihologică și fiziologică a mediului ambiant asupra oamenilor.

2.1. NOȚIUNI FUNDAMENTALE IN TEHNICA ILUMINATULUI

2.1.1. Mărimi și unități fotometrice

Lumina face parte din domeniul radiațiilor electromagnetice produse de oscilațiile particulelor electrizate care compun materia. Radiațiile electromagnetice sînt caracterizate prin lungimea de undă λ și frecvența f, ale căror valori sînt invers proporționale

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{2.1}$$

$c = 3.10^5$ km/s fiind viteza luminii în vid.

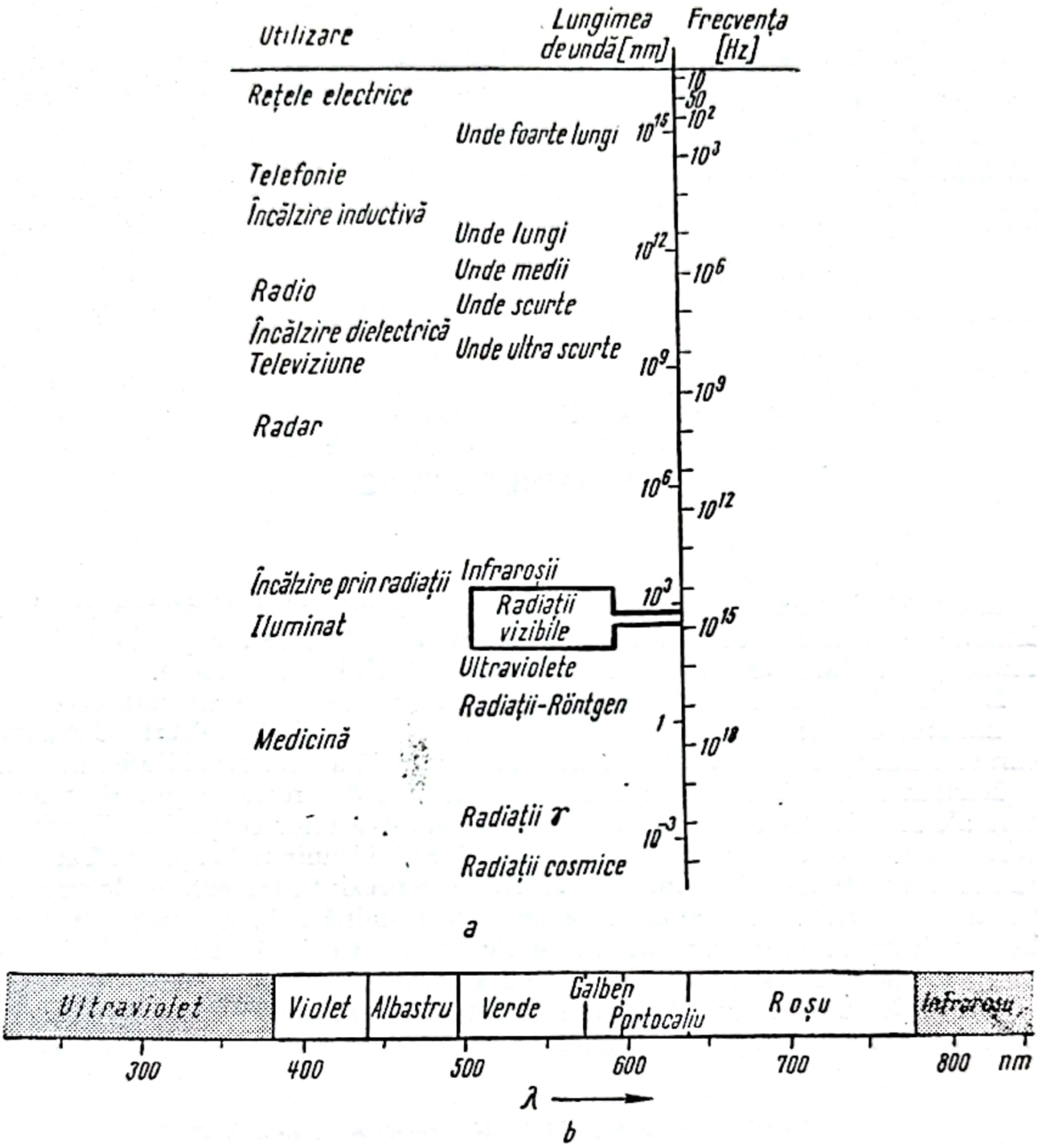


Fig. 2.1. Spectrul radiațiilor electromagnetice *a* și spectrul radiațiilor vizibile *b*.

Reprezentarea radiațiilor electromagnetice după lungimea de undă (avînd ca unitate de măsură nanometrul 1 nm = 10^{-9} m) sau după frecvența (în Hz), se numește spectrul radiațiilor electromagnetice (fig. 2.1, *a*).

Radiațiile care impresionează ochiul, deci care produc senzații luminoase, se numesc *radiații vizibile* sau *luminoase*, și reprezintă partea din spectrul radiațiilor electromagnetice cuprinsă între limitele 380 și 760 nm.

Radiațiile vizibile de o anumită lungime de undă sînt denumite radiații monocromatice și produc asupra ochiului senzația unei anumite culori.

Spectrul vizibil poate fi împărţit în şase zone, corespunzătoare culorilor fundamentale: violet, albastru, verde, galben, portocaliu şi roşu (fig. 2.1,*b*). Limitele care separă aceste zone nu pot fi precis definite, ele variind de la un observator la altul. Totalitatea radiaţiilor monocromatice vizibile, luate într-o anumită proporţie, dă senzaţia culorii albe. Prin suprapunerea mai multor radiaţii monocromatice se obţin radiaţiile complexe sau policromatice.

Lumina este caracterizată prin mărimi energetice, evaluate prin unităţi de măsură energetice şi prin mărimi fotometrice, evaluate în unităţi de măsură fotometrice.

Fotometria este ştiinţa măsurării mărimilor caracteristice luminii şi fenomenelor luminoase evaluate pe baza senzaţiilor luminoase produse. Mărimile fotometrice sînt, deci, mărimi fizico-fiziologice. Pentru evaluarea lor şi pentru definirea unităţilor fotometrice corespunzătoare în raport cu cele energetice s-a adoptat, convenţional, *observatorul fotometric de referinţă* (ochiul mijlociu). Necesitatea definirii observatorului fotometric de referinţă a rezultat din situaţia că intensitatea senzaţiei luminoase este diferită, în condiţii energetice egale, pentru diferitele culori ale spectrului. Pentru acest observator, ochiul prezintă cea mai mare sensibilitate la radiaţia monocromatică galben-verzuie, avînd lungimea de undă $\lambda = 556$ nm; radiaţiile monocromatice cu altă lungime de undă produc senzaţii luminoase mai mici.

Fluxul luminos. Fluxul luminos Φ primit sau emis de un corp este fluxul de energie radiantă Φ_e (puterea radiantă) emis sau primit de acel corp, evaluat după senzaţia luminoasă pe care o produce. Intensitatea senzaţiei vizuale produse de o radiaţie care cade asupra ochiului depinde de putere (fluxul energetic Φ_e), nu de energia radiantă.

Deoarece sensibilitatea ochiului nu este aceeaşi pentru radiaţii cu diferite lungimi de undă, legătura dintre fluxul luminos $\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$ şi fluxul energetic $\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$, radiate pe o anumită lungime de undă λ, este dată de *eficacitatea luminoasă spectrală relativă*

$$v_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{e\lambda}}. \qquad (2.2)$$

Valorile acestui coeficient, stabilite de Comisia Internaţională de Iluminat, sînt indicate în figura 2.2 în funcţie de lungimea de undă. Din figură se observă că eficacitatea luminoasă spectrală relativă are valori mai

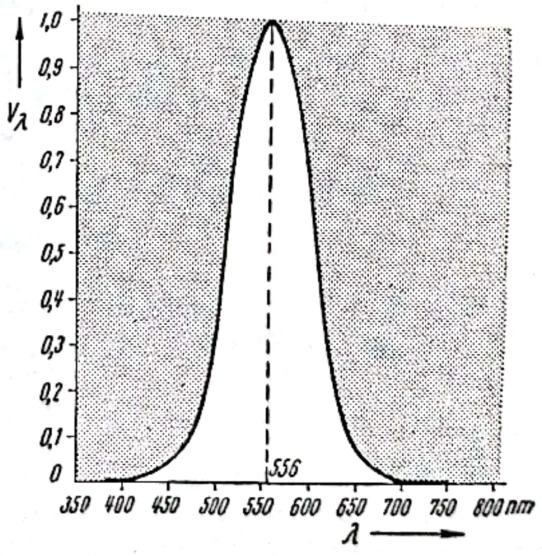


Fig. 2.2. Eficacitatea luminoasă spectrală relativă pentru observatorul fotometric de referinţă.

mici sau cel mult egale cu unu, valoarea sa maximă corespunzînd lungimii de undă $\lambda = 556$ nm.

Deoarece fluxul energetic al radiației monocromatice este exprimat în waţi, iar v_λ este o mărime adimensională, din relația (2.2) rezultă că unitatea de măsură a fluxului luminos este wattul luminos (Wl), calificativul „luminos" arătînd că acest flux este evaluat după senzația luminoasă pe care o produce. În tehnica iluminatului se întrebuinţează o altă unitate de măsură pentru fluxul luminos, numită lumen (lm), definită în funcţie de unitatea de intensitate luminoasă (candela), deoarece pentru această mărime s-a realizat etalonul fundamental de măsură.

Lumenul este fluxul luminos emis într-un unghi solid de un steradian, de către o sursă punctiformă, care are intensitatea luminoasă de o candelă după axa unghiului solid; legătura dintre wattul luminos şi lumen este

$$1\text{Wl} = 680\ \text{lm}.$$

Pe baza consideraţiilor anterioare, fluxul luminos al unei radiaţii monocromatice (rel. 2.2) se exprimă sub forma

$$\Phi_\lambda = 680\ v_\lambda \Phi_{e\lambda}\ [\text{lm}]. \tag{2.3}$$

Dacă se reprezintă fluxul energetic $\Phi_{e\lambda}$ în funcţie de lungimea de undă λ, se obţine *curba de repartiţie spectrală* a fluxului energetic. Curba de repartiţie spectrală a unei radiaţii monocromatice este reprezentată printr-o linie dreaptă (banda de lăţime foarte mică) verticală. În cazul radiaţiilor complexe, curba de repartiţie spectrală poate fi continuă — cînd se compune dintr-o infinitate de radiaţii simple, sau discontinuă — formată din linii sau benzi (fig. 2.25).

Pentru a radiaţie complexă, fluxul luminos este

$$\Phi = 680 \int_0^\infty v_\lambda \Phi_{e\lambda}\, d\lambda\ [\text{lm}] \tag{2.4}$$

în cazul unei curbe de repartiţie spectrală continue, şi

$$\Phi = 680\, \Sigma\, v_\lambda \Phi_{e\lambda}\ [\text{lm}] \tag{2.5}$$

pentru o curbă de repartiţie spectrală discontinuă.

Intensitatea luminoasă. Deoarece sursele luminoase nu repartizează fluxul luminos în mod uniform în toate direcţiile, pentru a caracteriza acţiunea luminoasă într-o anumită direcţie se foloseşte noţiunea de intensitate luminoasă.

Intensitatea luminoasă I a unei surse luminoase punctiforme într-o direcţie se defineşte ca raportul dintre fluxul luminos $d\Phi$ şi mărimea unghiului solid $d\omega$ care cuprinde acest flux

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \tag{2.6}$$

Scanned with OKEN Scanner

Unitatea de măsură pentru intensitatea luminoasă este *candela* (cd), unitate fundamentală a sistemului SI, definită astfel: candela este intensitatea luminoasă după direcţia normală a unei suprafeţe de 1/60 cm² a radiatorului integral (corp negru) aflat la temperatura de solidificare a platinei ($T = 2046{,}5\,°K$).

În general, intensitatea luminoasă a unei surse variază cu direcţia în spaţiu. Sursa luminoasă este *uniformă*, dacă intensitatea luminoasă este aceeaşi în toate direcţiile; fluxul emis în întregul spaţiu de o sursă uniformă este

$$\Phi_t = \int I \mathrm{d}\omega = I \int \mathrm{d}\omega = 4\pi I. \tag{2.7}$$

Pentru o sursă *neuniformă*, care emite fluxul Φ în unghiul solid ω, se poate defini o intensitate luminoasă medie în acel unghi solid

$$I_{med} = \frac{\Phi}{\omega}, \tag{2.8}$$

luînd în considerare fluxul luminos total emis de sursă se poate defini o intensitate luminoasă medie sferică

$$I_{ms} = \frac{\Phi_t}{4\pi}. \tag{2.9}$$

Pentru a reprezenta repartiţia în spaţiu a intensităţii luminoase a unei surse se foloseşte *corpul fotometric* al sursei, care se obţine unind printr-o suprafaţă închisă extremităţile razelor vectoare reprezentînd intensităţile pe diferite direcţii.

Sursele luminoase sînt *simetrice*, dacă corpul lor fotometric are o axă de simetrie. Oricare plan care trece prin axa de simetrie a unei surse simetrice taie corpul fotometric după o curbă identică, care se numeşte *curbă longitudinală a intensităţilor luminoase* sau, mai pe scurt, *curbă fotometrică* (fig. 2.45, *a*); curbele fotometrice se construiesc în coordonate polare, diagrama fiind gradată în candele, prin cercuri concentrice.

În cazul surselor luminoase *nesimetrice*, corpul fotometric nu mai are o axă de simetrie, iar curbele fotometrice longitudinale nu mai sînt identice. Pentru a caracteriza repartiţia în spaţiu a intensităţilor luminoase se utilizează:

— o familie de curbe fotometrice, fiecare curbă corespunzînd unei secţiuni cu un plan care face un anumit unghi cu un plan de referinţă (fig. 2.45, *b*);

— curbele izocandele, reprezentînd locul geometric al punctelor de pe o sferă concentrică cu sursa luminoasă, corespunzătoare direcţiilor care au aceeaşi intensitate luminoasă (fig. 2.46).

Iluminarea şi legile ei. Iluminarea măsoară densitatea de flux luminos primit de o suprafaţă.

Scanned with OKEN Scanner

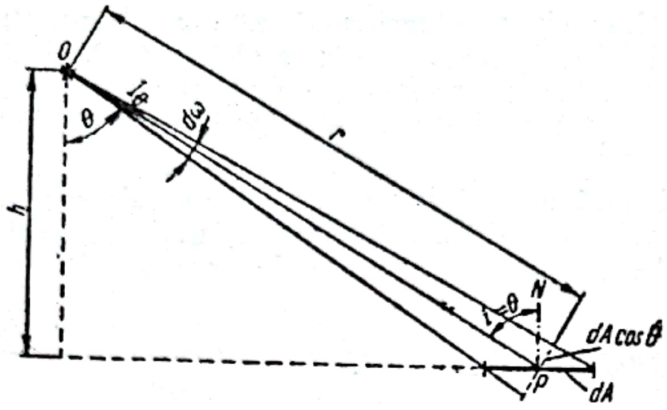


Fig. 2.3. Iluminarea unei suprafeţe.

Iluminarea E a unei suprafeţe, într-un punct al acesteia, este raportul dintre fluxul luminos $d\Phi$ primit de elementul de suprafaţă din jurul acelui punct şi aria dA a elementului de suprafaţă

$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \qquad (2.10)$$

Unitatea de măsură a iluminării în sistemul SI este *luxul* (lx), definit ca iluminarea suprafeţei care primeşte un flux luminos de un lumen, uniform repartizat pe un metru pătrat.

În general, în diversele puncte ale unei suprafeţe iluminările au valori diferite, deoarece fluxul nu este uniform repartizat. Se poate defini o valoare medie a iluminării unei suprafeţe, ca raportul dintre fluxul luminos Φ primit de această suprafaţă şi aria A a suprafeţei

$$E_{med} = \frac{\Phi}{A}. \qquad (2.11)$$

Pentru calculul iluminării într-un punct P al unei suprafeţe (fig. 2.3), dată de o sursă punctiformă O, amplasată la înălţimea h, se utilizează o relaţie derivată din relaţia (2.10). Fluxul luminos $d\Phi$ emis în unghiul solid elementar $d\omega$ sub care se vede suprafaţa dA din punctul O va fi

$$d\Phi = I_\theta \, d\omega, \qquad (2.12)$$

unde I_θ este intensitatea luminoasă a sursei, în direcţia punctului P. Dacă normala la suprafaţa dA face cu direcţia OP unghiul de incidenţă $i = \theta$, unghiul solid elementar va avea valoarea

$$d\omega = \frac{dA \cos\theta}{r^2}. \qquad (2.13)$$

Înlocuind expresiile (2.12) şi (2.13) în relaţia (2.10) rezultă

$$E_p = \frac{I_\theta \cos\theta}{r^2}, \qquad (2.14)$$

care exprimă cele două legi fundamentale ale iluminării: *legea pătratelor distanţelor* — iluminarea unei suprafeţe este invers proporţională cu pătratul distanţei (θ = constant) şi *legea cosinusului* — iluminarea variază cu cosinusul unghiului de incidenţă (r = constant).

Excitanţa luminoasă. Excitanţa luminoasă (radianţa, emitanţa) este o densitate superficială de flux luminos însă spre deosebire de iluminare, este o densitate de flux emis.

Scanned with OKEN Scanner

Excitanța luminoasă într-un punct al unei suprafețe este raportul dintre fluxul luminos $d\Phi$ emis de suprafața elementară dA din jurul acelui punct și mărimea acestei suprafețe

$$M = \frac{d\Phi}{dA}. \tag{2.15}$$

Cînd fluxul luminos Φ radiat de suprafața A a unei surse luminoase nu este uniform, se poate defini o valoare medie a excitanței luminoase

$$M_{med} = \frac{\Phi}{A}. \tag{2.16}$$

Această mărime se aplică nu numai suprafețelor care produc fluxul luminos, ci și suprafețelor care reflectă sau transmit fluxul luminos primit de la o sursă primară de lumină.

Unitatea de măsură a excitanței luminoase este *lumenul pe metru pătrat* (lm/m^2), definit ca și luxul, cu deosebirea că se referă la fluxul luminos emis de o suprafață.

Luminanța. Luminanța (strălucirea) este mărimea fotometrică percepută direct de ochi și se referă atît la izvoarele de lumină cît și la suprafețele iluminate ; spre deosebire de excitanță, luminanța indică și repartiția spațială a fluxului luminos emis.

Luminanța L într-un punct P al suprafeței unei surse, într-o anumită direcție (direcție care formează cu normala N la suprafață în punctul respectiv un unghi ε), este definită ca raportul dintre intensitatea luminoasă dI_ε în direcția considerată și aria proiecției ortogonale a elementului de suprafață dA din jurul acelui punct, pe un plan perpendicular pe această direcție (fig. 2.4)

$$L = \frac{dI_\varepsilon}{dA \cos \varepsilon}. \tag{2.17}$$

Pentru corpuri de luminanță constantă în toate direcțiile, care se mai numesc corpuri perfect difuzante, relația (2.17) se scrie sub forma

$$L = \frac{I_\varepsilon}{A \cos \varepsilon} \tag{2.18}$$

și exprimă legea lui Lambert, după care la corpurile avînd luminanță constantă pe întreaga lor suprafață și în toate direcțiile, intensitatea luminoasă într-o direcție oarecare este egală cu produsul dintre luminanță și aria proiecției suprafeței corpului pe un plan perpendicular pe direcția dată.

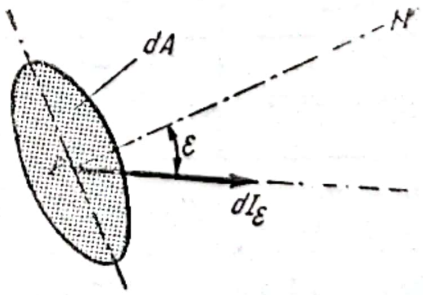


Fig. 2.4. Luminanța într-un punct al unei suprafețe.

Ca surse de luminanţă constantă se pot considera tuburile fluorescente, suprafeţele reflectante mate (iluminate uniform), plăcile difuzante din sticlă opalină etc.

Unitatea de măsură pentru luminanţă în sistemul SI este *nitul* (nt), definit ca luminanţa uniformă a unei suprafeţe plane de un metru pătrat, a cărei intensitate luminoasă după direcţia normală la suprafaţă este de o candelă.

Cantitatea de lumină. Expunerea luminoasă. Cantitatea de lumină Q este produsul dintre fluxul luminos Φ şi durata sa t

$$Q = \int_0^t \Phi \, dt \, . \tag{2.19}$$

Această mărime indică energia debitată de o sursă luminoasă sau primită de o suprafaţă, energie măsurată după senzaţia luminoasă pe care o produce. Unitatea de măsură în sistemul SI este *lumensecunda* (lm.s).

Expunerea luminoasă este o mărime care reprezintă densitatea de suprafaţă a cantităţii de lumină primită sau produsul dintre iluminare şi durata sa

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int_0^t E \, dt. \tag{2.20}$$

Această mărime intervine în fotografie şi în studiul facultăţilor vizuale. Unitatea de măsură în sistemul SI este *lux-secunda* (lx.s). Tabela 2.1 conţine mărimile şi unităţile de măsură fotometrice în sistemele SI şi CGS.

Tabela 2.1

Principalele mărimi fotometrice

Mărimea	Formula de definiţie	Valoarea medie	Unităţi de măsură		
			Sistemul SI	Sistemul CGS	Relaţii de legătură
Intensitate luminoasă	$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$	$I = \frac{\Phi}{\omega}$	candelă [cd]	candelă [cd]	—
Flux luminos	$\Phi = 680 \int_0^\infty v_\lambda \Phi_\lambda d\lambda$	—	lumen [lm]	lumen [lm]	—
Iluminare	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	$E = \frac{\Phi}{A}$	lux [lx]	phot [ph]	1 lx = 10^{-4} ph
Excitanţă luminoasă	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	$M = \frac{\Phi}{A}$	lumen/m^2 [lm/m^2]	lumen/cm^2 [lm/cm^2]	1 lm/m^2 = $= 10^{-4}$ lm/cm^2

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.1 (continuare)

Mărimea	Formula de definiţie	Valoarea medie	Unităţi de măsură		
			Sistemul SI	Sistemul CGS	Relaţii de legătură
Luminanţă	$L = \frac{dI_\varepsilon}{dA \cos \varepsilon}$	$L = \frac{I_\varepsilon}{A \cos \varepsilon}$	nit [nt], candelă/m² [cd/m²]	stilb [sb]	1 nt = $= 10^{-4}$ sb
Cantitate de lumină	$Q = \int_0^t \Phi dt$	$Q = \Phi t$	lumen-secundă [lm · s]	lumen-secundă [lm · s]	–
Expunere luminoasă	$H = \int_0^t E dt$	$H = Et$	lux-secundă [lx · s]	phot-secundă [ph · s]	1 lx · s = $= 10^{-4}$ ph · s

2.1.2. Proprietăţile fotometrice ale materialelor

Dacă asupra unui corp cade un flux luminos, o parte se va reflecta Φ_r, o parte va fi absorbită de corp Φ_a şi o parte va trece prin corp Φ_t. Notînd cu Φ_i fluxul incident şi aplicînd legea conservării energiei, se poate scrie

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t. \tag{2.21}$$

Din punct de vedere fotometric, proprietăţile materialelor sînt caracterizate prin valorile factorilor:

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} - \text{ de reflexie,} \tag{2.22}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} - \text{ de absorbţie,} \tag{2.23}$$

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} - \text{ de transmisie,} \tag{2.24}$$

între care (pe baza rel. 2.21) există relaţia

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \tag{2.25}$$

Valorile factorilor de reflexie şi transmisie sînt date în tabela 2.2 pentru cîteva materiale utilizate în tehnica iluminatului.

Reflexia sau transmisia fluxului luminos poate fi:

— *regulată*, cînd unei raze luminoase incidente îi corespunde o singură rază reflectată sau transmisă (fig. 2.5, *a* şi 2.6, *a*);

— *difuză*, cînd razele sînt reflectate sau transmise în mai multe direcţii (fig. 2.5, *b* şi 2.6, *b*);

Scanned with OKEN Scanner

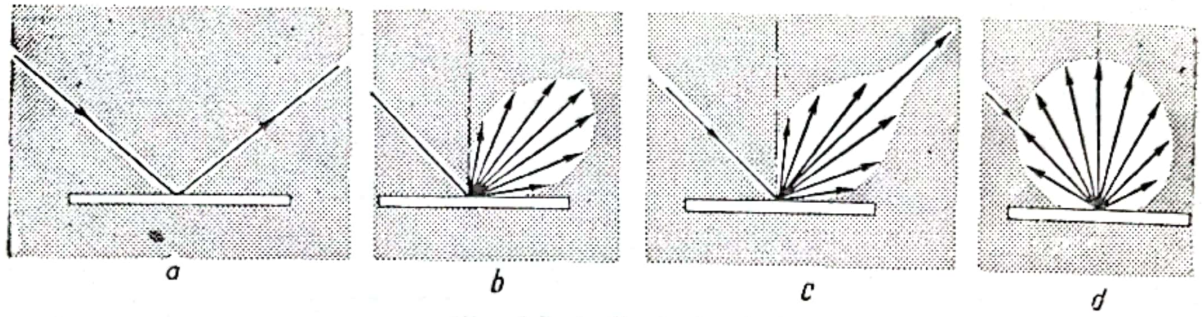


Fig. 2.5. Reflexia luminii:
a — regulată; *b* — difuză; *c* — mixtă; *d* — perfect difuză.

Tabela 2.2

Factorii de reflexie şi transmisie ai unor materiale utilizate în tehnica iluminatului [33]

Materialul	*Factorul de* reflexie ρ [%]	*Factorul de* transmisie τ [%]
Zugrăveală de culoare: — albastră intensă	5...10	—
— verde	15...25	—
— cafenie	25...35	—
— roşie deschis	30...35	—
— albastră foarte deschisă	45...60	—
— galben foarte deschisă	60...75	—
— albă	75...80	—
Sticlă opalină incoloră, de 3,5...5 mm grosime	7...24	60...90
Sticlă clară de 1...3 mm grosime	8...10	80...92
Sticlă lăptoasă	50	40
Lemn de stejar	25...35	—
Hirtie de culoare medie, slab difuzantă	30...37	36...42
Nichel şlefuit mat	50	—
Aluminiu polizat	65...75	—
Oţel aliat inoxidabil mat	50...55	—
Porţelan alb lucios	65...77	—
Ipsos	90...95	—
Beton (pereţi, tavan)	30...50	—

— *mixtă*, cînd reflexia sau transmisia este parţial regulată şi parţial difuză (fig. 2.5, *c* şi 2.6, *c*);

— *perfect difuză*, dacă luminanţa suprafeţei materialului este aceeaşi în toate direcţiile (fig. 2.5, *d* şi 2.6, *d*).

Reflexia regulată este caracteristică suprafeţelor netede lustruite; astfel de suprafeţe apar întunecate în toate direcţiile, cu excepţia direcţiei razei de lumină reflectate. Reflexia difuză caracterizează suprafeţele metalice mate, iar reflexia perfect difuză — materialele cu o granulaţie fină şi uniformă, ca de exemplu vopseaua albă. Reflexia mixtă apare la sticla opalină, glazura de porţelan, marmură.

Scanned with OKEN Scanner

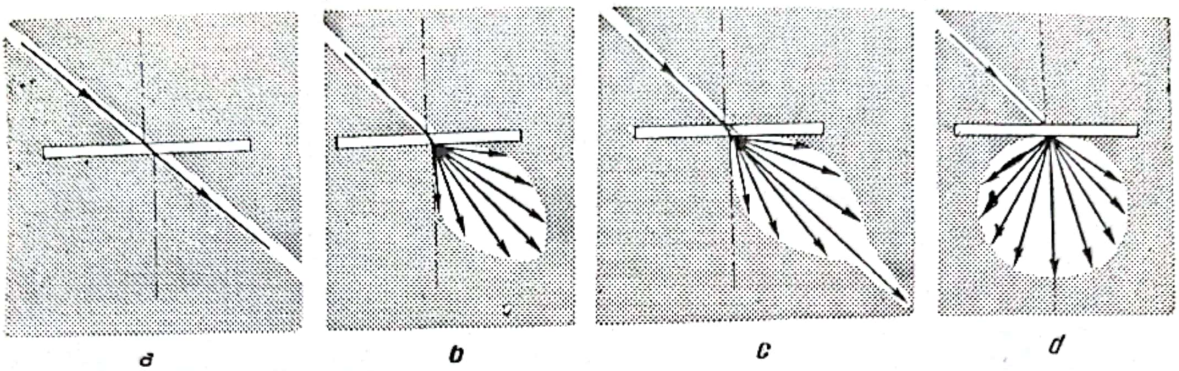


Fig. 2.6. Transmisia luminii :
a — regulată ; *b* — difuză ; *c* — mixtă ; *d* — perfect difuză.

Transmisia regulată este caracteristică sticlei transparente, cea difuză-sticlei mate, cea perfect difuză-sticlei lăptoase, iar cea mixtă sticlei opaline.

Din punct de vedere al dependenţei factorilor fotometrici de lungimea de undă a radiaţiei luminoase incidente, corpurile sînt :

— *necolorate*, caracterizate prin faptul că factorii ρ, α şi τ nu depind de λ şi de aceea corpul reflectă, absoarbe şi transmite neselectiv lumina ;

— *colorate*, caracterizate prin faptul că ρ, α şi τ depind de λ, corpul reflectînd, absorbind şi transmiţînd selectiv lumina.

2.1.3. Măsurarea mărimilor fotometrice

Determinarea valorilor mărimilor din tehnica iluminatului se face prin măsurări fotometrice vizuale (subiective) sau fizice (obiective). Măsurările fotometrice vizuale folosesc proprietatea ochiului omenesc de a aprecia dacă luminanţele a două suprafeţe alăturate şi de aceeaşi culoare sînt sau nu egale. Măsurările fotometrice fizice folosesc proprietăţile unor corpuri de a produce fotocurenţi sau termocurenţi, sau de a-şi modifica rezistivitatea electrică sub acţiunea unui flux luminos.

Fotometria fizică prezintă mari avantaje de rapiditate şi precizie, atunci cînd se compară surse luminoase avînd aceeaşi compoziţie spectrală ; pentru surse cu compoziţii spectrale diferite, fotometria vizuală este mai avantajoasă decît cea fizică, excepţie făcînd numai spectrofotometria.

Aparatele care servesc la măsurarea mărimilor fotometrice se numesc fotometre. Fotometrele pot fi construite pentru măsurarea anumitor mărimi fotometrice, purtînd denumiri speciale în funcţie de utilizarea lor : luxmetru, lumenmetru, luminanţmetru, exponometru etc.

Măsurările fotometrice constau, în primă instanţă, în compararea mărimilor fotometrice de măsurat cu etaloane. Etalonul primar internaţional al fotometriei este *corpul negru*, încălzit la temperatura de solidificare a platinei — etalon de intensitate luminoasă. Prin comparare directă sau indirectă cu etalonul primar se realizează etaloane secundare, care sînt surse de lumină constantă şi reproductibilă. Pentru măsurări de laborator se utilizează lămpi cu incandescenţă drept etaloane secundare.

Scanned with OKEN Scanner

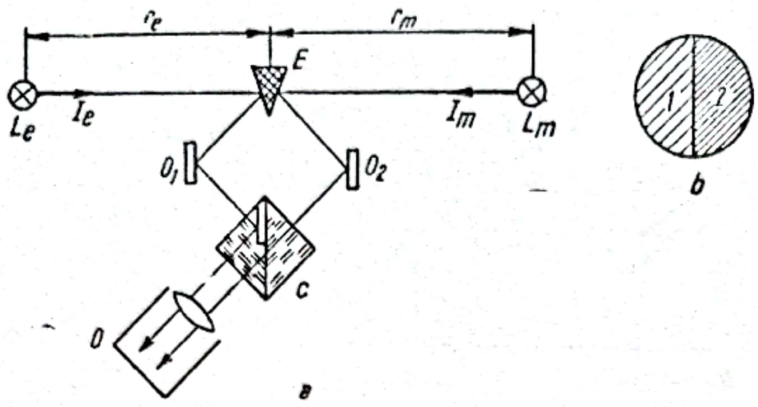


Fig. 2.7. Fotometrul Lummer — Brodhun:
a — schema de principiu; *b* — cîmpul vizual.

Măsurarea intensităţii luminoase. Măsurarea intensităţii luminoase se face prin intermediul luminanţelor. Cel mai răspîndit fotometru este fotometrul Lummer-Brodhun (fig. 2.7). Elementul său de bază este cubul fotometric *C*, format din două prisme drepte din sticlă incoloră, avînd o pană de aer pe o porţiune a suprafeţei de contact; razele luminoase de la sursa etalon L_e suferă o reflexie totală, în timp ce razele de la sursa de măsurat L_m sînt transmise direct observatorului. Fotometrul cuprinde un ecran E cu două feţe difuzante, iluminate de cele două surse şi două oglinzi cu reflexie totală O_1 şi O_2, ce trimit razele luminoase spre cubul fotometric şi ocularul O.

Observatorul care priveşte prin ocular va vedea în partea stîngă faţa ecranului luminată de sursa L_e, iar în partea dreaptă-faţa ecranului luminată de sursa L_m. Prin deplasarea surselor faţă de fotometru se obţine egalitatea luminanţelor celor două feţe ale ecranului, adică iluminări egale ale feţelor ecranului

$$E_e = \frac{I_e \cos 0}{r_e^2} = E_m = \frac{I_m \cos 0}{r_m^2}; \qquad (2.26)$$

rezultă intensitatea luminoasă a sursei de măsurat

$$I_m = I_e \frac{r_m^2}{r_e^2}, \qquad (2.27)$$

în funcţie de intensitatea luminoasă I_e a sursei etalon şi de distanţele r_e, r_m de la ecran la cele două surse.

Intensitatea luminoasă a unei surse într-o singură direcţie caracterizează însă insuficient sursa, şi deci trebuie să se măsoare intensităţile luminoase în diferite direcţii ale spaţiului. Scopul acestor măsuri este obţinerea curbelor fotometrice în anumite plane (§ 2.1.1). Dispozitivele utilizate în laboratoare pentru ridicarea curbelor fotometrice sînt foarte diferite; la unele dintre acestea sursa de lumină este rotită în jurul unui ax perpendicular pe planul în care se determină curba fotometrică, fotometrul fiind menţinut în aceeaşi poziţie.

Măsurarea fluxului luminos. Pentru a măsura fluxul luminos al corpurilor de iluminat prin comparaţie cu un etalon de flux luminos, se utilizează

lumenmetrul Ulbricht. Lumenmetrul (fig. 2.8) se compune dintr-o sferă metalică goală (diametru 0,5 .... 4m), avînd suprafaţa interioară vopsită cu vopsea albă mată, care produce reflexia difuză (ca de exemplu în punctul K). Sfera este prevăzută cu o fereastră F din sticlă opalină, în care se plasează fotometrul. Razele sursei luminoase L sînt împiedecate de către un ecran E să cadă direct asupra ferestrei.

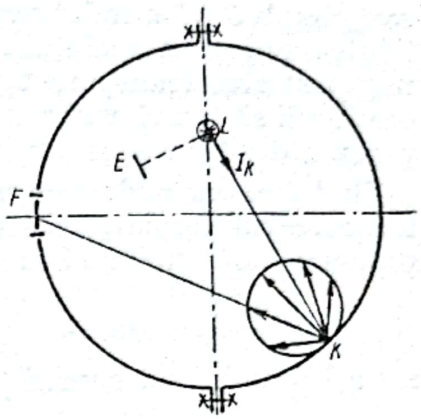


Fig. 2.8. Schema lumenmetrului sferic.

Se demonstrează [2], [37] că iluminarea este aceeaşi pentru oricare punct de pe suprafaţa interioară a sferei, independent de repartiţia în spaţiu a intensităţilor luminoase ale sursei sau de poziţia sursei în sferă, fiind proporţională cu fluxul luminos total emis de sursă

$$E = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{\Phi}{4\pi R^2} = k\Phi, \tag{2.28}$$

cu notaţia

$$k = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{1}{4\pi R^2},$$

unde k este constanta lumenmetrului sferic, ρ — factorul de reflexie al suprafeţei interioare a sferei şi R — raza interioară a sferei.

Efectuîndu-se două măsurători ale iluminării ferestrei F, una cu o sursă etalon al cărei flux luminos Φ_e este cunoscut şi alta cu sursa al cărei flux Φ_m urmează a fi determinat, se obţine

$$\Phi_m = \Phi_e \frac{E_m}{E_e}, \tag{2.29}$$

E_e şi E_m fiind iluminările produse de sursa etalon şi sursa de măsurat.

Măsurarea iluminării. Aparatele utilizate pentru măsurarea iluminării se numesc luxmetre, cele mai răspîndite făcînd parte din categoria fotometrelor fizice. Ca elemente sensibile la acţiunea radiaţiilor luminoase se utilizează termocupluri (§ 3.1.5), celule fotoelectrice şi rezistenţe fotoelectrice.

Celula fotoelectrică cu seleniu (fig. 2.9) se compune dintr-o placă de bază *1* din oţel (electrodul pozitiv), care susţine un disc foarte subţire de seleniu *2*, peste care este depus prin pulverizare catodică un strat transparent de aur, platină

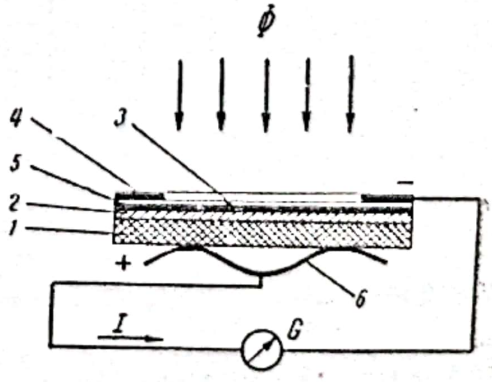


Fig. 2.9. Celulă fotoelectrică cu seleniu.

sau plumb *3* (electrodul negativ) ; aceste elemente componente sînt consolidate cu ajutorul inelului metalic *4* şi a resortului *6*. Între discul de seleniu şi stratul transparent se formează un strat de blocare *3*, care lasă electronii să treacă mai uşor în sensul placă de bază — seleniu — strat transparent, decît în sens invers.

Cînd lumina cade pe celulă, stratul de seleniu eliberează electroni ; fotocurentul format, măsurat cu un galvanometru *G*, are intensitatea *I* proporţională cu fluxul luminos Φ care cade pe suprafaţa *A* a celulei

$$I = k\Phi = kEA\ ; \tag{2.30}$$

rezultă iluminarea suprafeţei celulei fotoelectrice

$$E = \frac{I}{kA}\ , \tag{2.31}$$

în care *k* este sensibilitatea integrală a celulei fotoelectrice cu seleniu, avînd valoarea medie de circa 400 $\mu A/\text{lm}$.

Deoarece curba eficacităţii luminoase spectrale relative a celulei fotoelectrice cu seleniu diferă mult de cea a observatorului de referinţă (fig. 2.10), apropierea celor două curbe este posibilă prin utilizarea unui filtru de corecţie.

Măsurarea luminanţei. Măsurarea fizică a luminanţelor a căpătat o importanţă crescîndă în ultimul timp, întrucît îmbunătăţirea calităţii instalaţiilor de iluminat impune realizarea anumitor luminanţe în cîmpul vizual. În figura 2.11 este indicat un luminanţmetru cu celulă fotoelectrică. Imaginea obiectului a cărui luminanţă se măsoară, se compară de către observator cu luminanţa unei lămpi electrice cu incandescenţă cu balon perfect difuzant, transmisă suprafeţei mătuite *a* a unei baghete de sticlă.

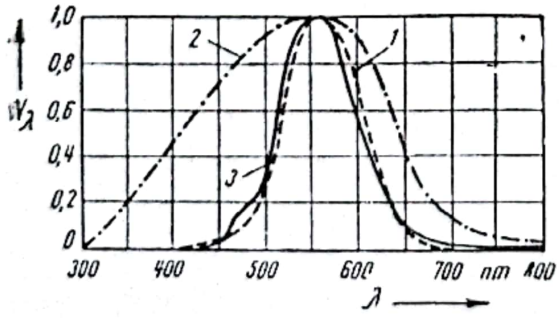


Fig. 2.10. Curbele eficacităţii luminoase spectrale relative :

1 — observatorul de referinţă ; *2* — celula fotoelectrică cu seleniu ; *3* — celula fotoelectrică cu seleniu cu filtru.

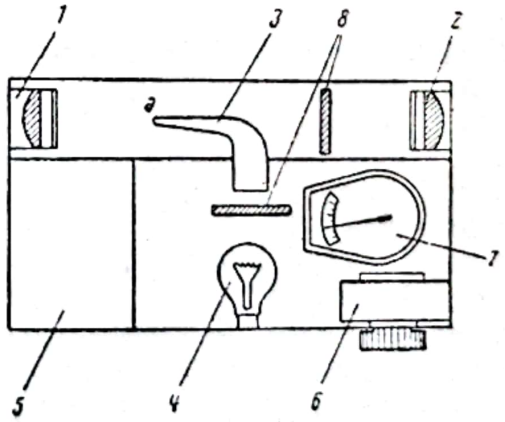


Fig. 2.11. Luminanţmetru cu celulă fotoelectrică :

1 — ocular ; *2* — obiectiv ; *3* — baghetă de sticlă ; *4* — lampă cu incandescenţă ; *5* — sursă de alimentare de curent continuu ; *6* — potenţiometru ; *7* — luxmetru gradat în nt ; *8* — filtre optice.

Atît iluminarea celulei foloelectrice cît şi luminanţa suprafeţei mătuite *a* sînt proporţionale cu intensitatea luminoasă a lămpii cu incandescenţă conform relaţiilor (2.14) şi (2.17), astfel că aparatul de măsură poate fi gradat direct în nit.

Prin variaţia curentului de alimentare a lămpii cu ajutorul potenţiometrului, observatorul poate obţine egalitatea celor două luminanţe.

2.1.4. Noţiuni de colorimetrie

Varietatea izvoarelor de lumină moderne, în special a lămpilor cu descărcări în gaze, implică probleme importante în legătură cu culoarea surselor şi redarea fidelă a culorilor corpurilor iluminate.

Culoarea este proprietatea percepţiei vizuale care permite unui observator să distingă diferenţe între două obiecte de aceleaşi dimensiuni, formă şi structură, cînd aceste diferenţe sînt cauzate de diferenţele de compoziţie spectrală ale radiaţiei care intervine în observaţie.

Fiecare radiaţie monocromatică produce senzaţia unei anumite culori; o radiaţie complexă de o anumită compoziţie spectrală poate produce aceeaşi senzaţie de culoare ca o altă radiaţie complexă avînd o compoziţie spectrală complet diferită.

Teoretic există o infinitate de radiaţii monocromatice în domeniul vizibil al spectrului, deci o infinitate de culori. Pentru a denumi culorile, domeniul vizibil s-a împărţit după lungimile de undă în şase benzi spectrale, cărora le corespund şase culori principale (fig. 1.1. *b*).

Din punct de vedere al acţiunii fiziologice produse, culorile pot fi *calde* (care conţin roşu sau portocaliu) şi *reci* (albastru şi galben).

Culoarea unui corp depinde de proprietăţile lui fotometrice şi de compoziţia spectrală a radiaţiei luminoase incidente.

Colorimetria este ştiinţa măsurării culorilor, care are la bază proprietăţile ochiului şi capacitatea lui de a distinge şi de a evalua culorile.

Constatarea că orice culoare poate fi reprodusă prin amestecul a trei culori fundamentale a stat la baza clasificării culorilor. Dintre sistemele de clasificare, cel mai răspîndit este *sistemul tricromatic normal C.I.E.*, definit prin trei culori fundamentale X, Y şi Z. Observatorul colorimetric de referinţă este compus din trei celule fotoelectrice $\bar{x}, \bar{y}$ şi $\bar{z}$, avînd fiecare o curbă particulară a eficacităţii luminoase spectrale relative (fig. 2.12). Dirijînd spre cele trei fotocelule radiaţia luminoasă a cărei culoare urmează a fi determinată se vor obţine curenţii electrici x', y' şi z' — numiţi *componente tricromatice spectrale.*

Rapoartele

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'}, \quad y = \frac{y'}{x' + y' + z'}, \quad z = \frac{z'}{x' + y' + z'}, \tag{2.32}$$

definesc *coordonatele tricromatice* în sistemul XYZ (CIE), a căror sumă

$$x + y + z = 1. \tag{2.33}$$

Scanned with OKEN Scanner

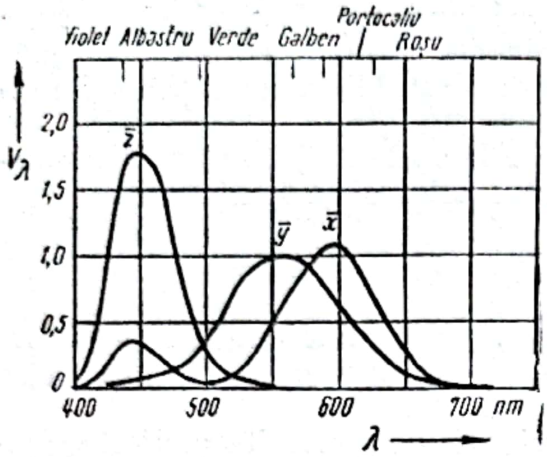


Fig. 2.12. Curbele componentelor tricromatice spectrale.

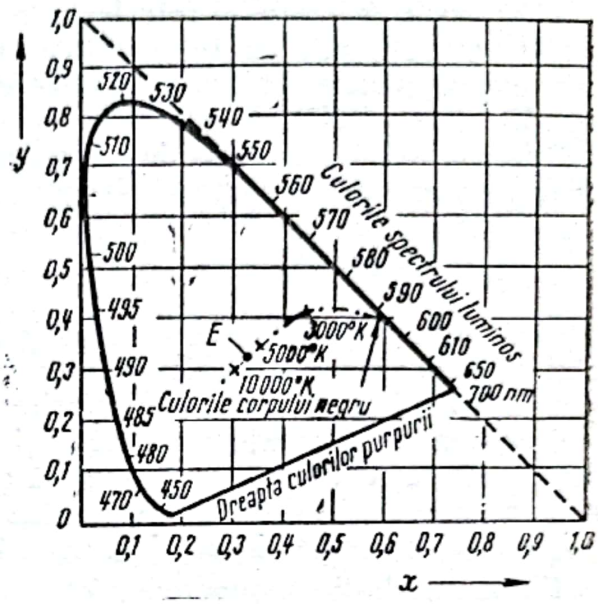


Fig. 2.13. Triunghiul culorilor CIE: → *E* — alb lumina zilei etalon.

În triunghiul culorilor (fig. 2.13) construit cu ajutorul coordonatelor x şi y ($z = 1 - x - y$), fiecărui punct îi va corespunde o anumită culoare.

În tehnica iluminatului proprietăţile colorimetrice ale izvoarelor de lumină se apreciază prin temperatura de culoare T_c. Compoziţia spectrală a radiaţiei corpului negru depinde de temperatura lui, în sensul că unei temperaturi date (în °K) îi corespunde întotdeauna o anumită culoare — curba întreruptă din figura 2.13. Culoarea oricărui izvor luminos poate fi definită, deci, prin temperatura corpului negru a cărui radiaţie produce aceeaşi senzaţie de culoare. De exemplu, temperatura de culoare a unei lămpi cu incandescenţă este de 2 400—3 000 °K, a lămpii fluorescente cu lumină albă de 4 300 °K.

2.2. IZVOARE ELECTRICE DE LUMINĂ

Emisia radiaţiilor luminoase de către izvoarele electrice de lumină se obţine cu ajutorul energiei electrice.

Izvoarele electrice de lumină se pot împărţi în trei categorii:

— *lămpi cu incandescenţă*, la care energia electrică este folosită pentru încălzirea filamentului pînă la temperaturi înalte; filamentul incandescent emite energie sub formă de radiaţii, a căror putere şi compoziţie spectrală sînt determinate de legile radiaţiei termice;

— *lămpi cu descărcări în gaze sau vapori metalici*, care se bazează pe fenomenul de luminescenţă, adică pe proprietatea descărcărilor electrice în gaze sau vapori metalici de a produce lumină;

— *lămpi cu arc*, la care se produc atît radiaţii termice cît şi efecte de luminescenţă.

2.2.1. Radiaţiile termice

Dacă un corp este încălzit, o parte a energiei sale termice se transformă în energie radiantă; purtătorul de energie radiantă îl constituie radiaţiile electromagnetice. Curba de repartiţie spectrală a radiaţiilor termice este continuă şi are în general, forma unui clopot însă aceasta, ca şi valorile ordonatelor, variază cu temperatura corpului radiant. Deci fluxul energetic Φ_e radiat de un corp depinde de temperatura T şi de lungimea de undă λ: $\Phi_e = \Phi_e(\lambda, T)$.

În tehnica iluminatului, proprietăţile izvoarelor de lumină (repartiţia spectrală a energiei radiante, proprietăţile fotometrice şi colorimetrice) se compară cu cele ale corpului negru (radiator integral) definit astfel: *corpul negru* absoarbe în întregime toate radiaţiile incidente, oricare ar fi direcţia sau lungimea lor de undă.

Legea Stefan-Boltzmann exprimă fluxul energetic total radiat pe toate lungimile de undă, de unitatea de suprafaţă a corpului negru — *excitanţa energetică totală* M_e în funcţie de temperatura absolută T a corpului negru

$$M_e(T) = \sigma \cdot T^4, \tag{2.34}$$

unde $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m² · °K⁴ este constanta Stefan-Boltzmann.

Relaţia (2.34) se utilizează şi sub forma:

$$M_e(T) = C_n \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \tag{2.35}$$

în care $C_n = 5{,}67$ W/m² · °K⁴ este constanta de radiaţie a corpului negru.

Legea Wien-Planck (legea deplasării maximului) stabileşte fluxul energetic radiat de unitatea de suprafaţă a corpului negru, pentru o anumită lungime de undă

$$M_e(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \tag{2.36}$$

în care constantele C_1 şi C_2 au valorile $C_1 = 3{,}74$ W.m², $C_2 = 1{,}44 \cdot 10^{-2}$m.°K.

Cu ajutorul relaţiei (2.36) se pot trasa curbele de repartiţie spectrală a excitanţei energetice pentru corpul negru aflat la diferite temperaturi (fig. 2.14). Maximele curbelor se deplasează spre lungimile de undă mici, pe măsură ce temperatura creşte. Pentru temperaturile filamentelor lămpilor obişnuite (2 500 .... 3 000 °K), maximele curbe-

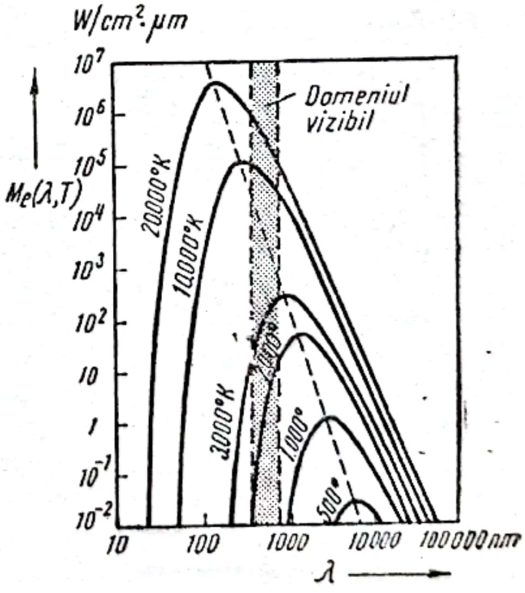


Fig. 2.14. Curbele de repartiţie spectrală a excitanţei energetice pentru corpul negru aflat la diferite temperaturi.

lor se află în domeniul radiaţiilor infraroşii; temperatura corpului negru la care maximul curbei corespunde lungimii de undă $\lambda = 556$ nm ($v_\lambda = 1$) este de 5 269 °K.

Legea lui Kirchhoff stabileşte o legătură între proprietăţile radiante ale unui corp încălzit şi factorul de absorbţie al acestuia.

Din fluxul energetic primit de un corp, o parte este absorbit altă parte trece prin corp şi restul este reflectat. Factorii care arată părţile din fluxul energetic primit, care sînt absorbite, transmise şi reflectate se numesc factori energetici de absorbţie $\alpha(\lambda, T)$, de transmisie $\tau(\lambda, T)$ şi de reflexie $\rho(\lambda, T)$; aceşti factori variază cu lungimea de undă şi cu temperatura absolută T. Este evident că

$$\alpha(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1. \tag{2.37}$$

Factorul energetic de absorbţie variază mult de la un corp la altul. Pentru corpul negru, factorul de absorbţie este egal cu unitatea pentru toate lungimile de undă şi temperaturile.

Kirchhoff a stabilit următoarea lege: raportul dintre excitanţa energetică $M'_e(\lambda, T)$ a unui corp (sursă sau receptor) şi factorul său de absorbţie $\alpha'(\lambda, T)$ este o constantă universală şi nu depinde de natura corpului,

$$\frac{M'_e(\lambda, T)}{\alpha'(\lambda, T)} = k. \tag{2.38}$$

Constanta universală k reprezintă excitanţa energetică a corpului negru $M_e(\lambda, T)$, deoarece factorul de absorbţie al acestuia $\alpha(\lambda, T) = 1$; deci

$$M'_e(\lambda, T) = \alpha'(\lambda, T) \cdot M_e(\lambda, T). \tag{2.39}$$

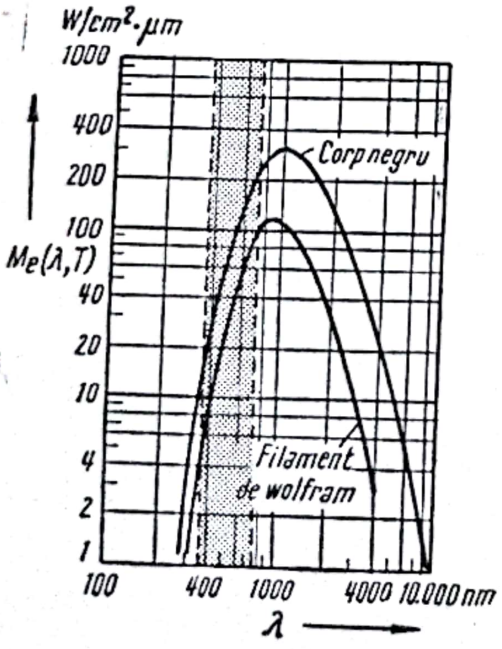


Fig. 2.15. Curbele de repartiţie spectrală a excitanţei energetice pentru corpul negru şi filamentul de wolfram la temperatura $T = 3\,000$ °K.

Corpurile naturale au factorul de absorbţie subunitar $\alpha'(\lambda, T) < 1$, deci fluxul energetic emis de unitatea de suprafaţă a acestor corpuri, pe o anumită lungime de undă şi la o anumită temperatură, este totdeauna mai mic decît fluxul energetic emis de unitatea de suprafaţă a corpului negru pe aceeaşi lungime de undă şi la aceeaşi temperatură — figura 2.15.

Din relaţiile (2.35) şi (2.39) se poate obţine excitanţa energetică a unui corp natural, sub forma

$$M'_e = C_n \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right], \tag{2.40}$$

în care $\varepsilon = C/C_n$ este gradul de înnegrire (tabela 2.3), iar C constanta de radiaţie a corpului.

Scanned with OKEN Scanner

O mărime importantă utilizată pentru aprecierea economicității surselor luminoase este *eficacitatea luminoasă* η_l, definită ca raportul dintre fluxul luminos Φ și puterea consumată P (fluxul energetic total)

$$\eta_l = \frac{\Phi}{P} = \frac{680 \int_{400}^{760} v_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda} \cdot \qquad (2.41)$$

Tabela 2.3

Gradul de înnegrire al diferitelor materiale [3]

Denumirea materialului	Temperatura °C	Gradul de înnegrire ε
Aluminiu lustruit	200...600	0,04...0,06
Aluminiu oxidat	600	0,11...0,19
Fier lustruit	600	0,2
Fier oxidat	600	0,83
Oțel lustruit	700	0,5
Oțel oxidat	600	0,8
Alamă lustruită	350	0,22
Alamă oxidată	600	0,6
Oțel crom-nichel	600	0,7
Cărămidă refractară	600	0,9
Lac alb	95	0,95
Lac negru opac	95	0,98
Vopsea cu praf de aluminiu	300	0,94
Sticlă	—	0,94
Porțelan	—	0,92

Unitatea de măsură a eficacității luminoase este lumenul pe watt (lm/W), definit ca eficacitatea luminoasă a unei surse care emite un flux luminos de 1 lumen pentru o putere consumată de 1 watt.

2.2.2. Lămpi cu incandescență

La lămpile cu incandescență emisiunea luminoasă se produce prin încălzirea unui filament de wolfram la o temperatură cuprinsă între 2000 și 3000 °K. Caracteristicile energetice fotometrice și colorimetrice ale lămpii cu incandescență sînt determinate de temperatura filamentului incandescent.

Eficacitatea luminoasă a unei lămpi cu incandescență normale are valori între 8 și 20 lm/W și este aproximativ proporțională cu puterea a cincea a temperaturii filamentului, ceea ce implică încălzirea filamentului la o temperatură cît mai ridicată: această încălzire este și în avantajul culorii care o dată cu creșterea temperaturii, trece dinspre gălbui spre alb. Ridicarea temperaturii filamentului are însă consecințe negative, și anume:

— creșterea vitezei de evaporare a metalului din care este fabricat filamentul determină scăderea duratei de funcționare a lămpii, deoarece filamentul se rupe ca urmare a reducerii secțiunii lui prin evaporare:

— fluxul luminos al lămpii scade datorită înnegririi balonului de sticlă de către particulele de wolfram evaporate și condensate pe balon.

Pentru a reduce aceste inconveniente, la lămpile normale se utilizează:

— umplerea balonului lămpii cu un gaz inert (amestec de azot și argon) avînd drept consecință mărirea probabilității de ciocnire a particulelor de wolfram evaporate, deci de revenire pe filament și micșorarea probabilității de depunere a acestor particule pe pereții balonului de sticlă; lămpile

Tabela 2.4

Caracteristicile lămpilor cu incandescenţă normale, de 220 V, fabricate în R.S.R.

Puterea nominală W	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W	Tipul soclului
15	105	7	
25	190	7,6	E 27
40	312	7,8	sau
60	517	8,6	B 22
75	690	9,2	
100	1040	10,4	
150	1770	11,8	
200	2540	12,7	
300	4270	14,2	
500	7350	14,7	E 40
1000	16700	16,7	

de putere mică (pînă la 25 W) se execută în vid întrucît viteza de evaporare este redusă din cauza temperaturii mici de funcţionare;

— spiralizarea simplă sau dublă a filamentului, avînd ca efect reducerea pierderilor termice şi posibilitatea de a mări temperatura filamentului.

Din cele expuse reiese că prin mărirea temperaturii filamentelor se poate obţine o mărire a eficacităţii luminoase, în detrimentul duratei de funcţionare. Durata de funcţionare a lămpii normale, adică timpul în care fluxul luminos al lămpii scade pînă la 80% din valoarea iniţială, este standardizată la 1 000 ore.

Lămpile cu incandescenţă se fabrică într-o varietate mare de tipuri constructive, caracterizate prin puterea absorbită, tensiunea de alimentare, fluxul luminos, dimensiuni, forma balonului şi tipul soclului.

Principalele caracteristici ale lămpilor cu incandescenţă pentru uz general sînt date în tabela 2.4.

Luminanţa acestor lămpi este foarte mare, de la $200 \cdot 10^4$ pînă la $1200 \cdot 10^4$ nt, producînd fenomene de orbire. Pentru reducerea acestei luminanţe se fabrică baloane mate sau opale (fluxul luminos al lămpii scăzînd însă cu circa 10% faă de lampa cu balonul clar) sau se depune un strat subţire de de SiO_2 sau TiO_2 pe balon, ceea ce reduce fluxul luminos cu 5%.

Culoarea gălbuie a luminii (temperatura de culoare este de 2 850 °K pentru lămpile cu gaz şi 2 450 °K pentru cele cu vid) poate fi ameliorată prin utilizarea baloanelor colorate, dar scade mult eficacitatea luminoasă.

Funcţionarea lămpii nu este afectată de temperatura mediului ambiant.

Variaţiile tensiunii de alimentare influenţează puternic mărimile caracteristice de funcţionare ale lămpilor cu incandescenţă (fig. 2.16). Dacă tensiunea reţelei de alimentare creşte cu 5%, eficacitatea luminoasă creşte cu 20%, însă durata de funcţionare scade cu 50%; cînd tensiunea reţelei scade, durata de funcţionare creşte, dar eficacitatea luminoasă scade.

Lămpi cu incandescenţă cu vapori de iod. Pentru a micşora şi mai mult evaporarea filamentului de wolfram, în condiţiile îmbunătăţirii sensibile a caracteristicilor lămpii cu incandescenţă cu gaz, în interiorul balonului se introduce o cantitate mică de iod. Între iod şi wolfram ia naştere un ciclu regenerator care constă în următoarele fenomene:

Scanned with OKEN Scanner

— la temperatura relativ ridicată a filamentului incandescent, moleculele de iod se disociază în atomi

$$I_2 \rightarrow 2I$$

care se împrăştie în spaţiul balonului;

— particulele de wolfram condensate pe balon sau aflate în apropierea lui la temperaturi relativ joase se combină cu atomi de iod, formînd iodura de wolfram WI_2 volatilă, care se răspîndeşte în balon;

— în vecinătatea filamentului, iodura se descompune eliberînd wolframul metalic care se depune pe filament, iodul rămînînd liber pentru o nouă reacţie.

Ciclul regenerator descris de reacţia

$$W + 2I \underset{1400 \ldots 1500\,^\circ C}{\overset{250 \ldots 1200\,^\circ C}{\rightleftharpoons}} WI_2$$

delimitează în interiorul balonului două zone de temperatură, separate de o suprafaţă izotermă de circa 1 300 °C (fig. 2.17). În zona exterioară este preponderentă reacţia de formare a iodurii de wolfram, împiedicîndu-se astfel depunerea particulelor de wolfram pe balon; în zona interioară predomină reacţia de disociere a iodurii de wolfram însoţită de mărirea concentraţiei particulelor de wolfram în apropierea filamentului, ceea ce micşorează viteza de evaporare a acestuia şi readuce wolframul pe filament care este astfel în permanenţă regenerat.

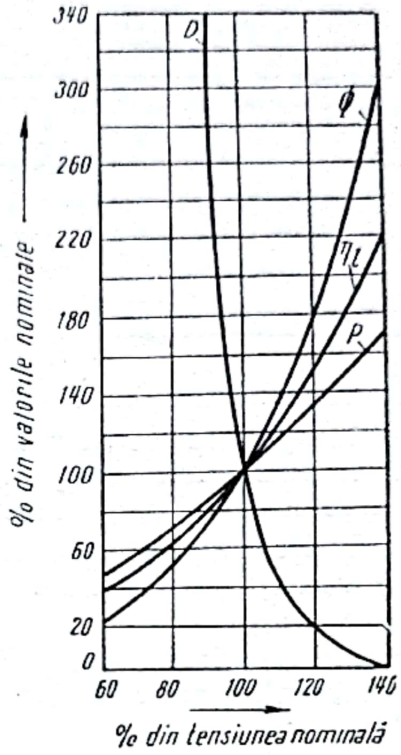


Fig. 2.16. Variaţia mărimilor caracteristice de funcţionare ale lămpilor cu incandescenţă în funcţie de tensiune:
P — puterea; η_l — eficacitatea luminoasă; Φ_l — fluxul luminos; D — durata de funcţionare.

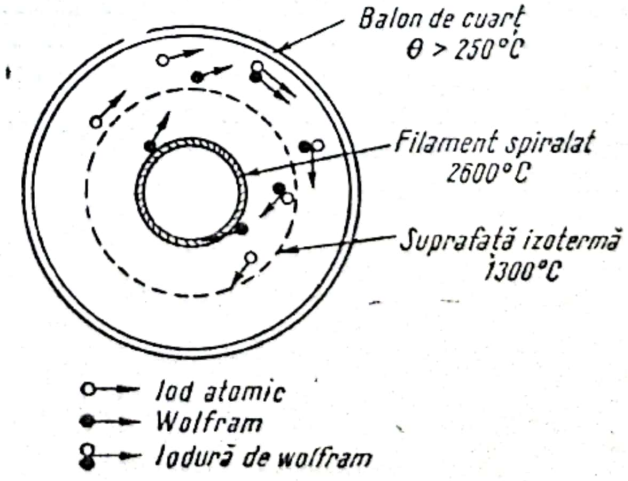


Fig. 2.17. Schema ciclului regenerator cu iod.

Tabela 2.5

Caracteristicile lămpilor cu vapori de iod (tip OSRAM)

Puterea nominală W	Tensiunea de alimentare V	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
500	130—220	12 000/11 000	24/22
1000	220	24 000	24
5000	—	125 000	25
10000	—	255 000	25,5

S-ar părea că datorită ciclului de regenerare a filamentului durata de funcţionare a lămpii cu vapori de iod ar fi nelimitată. Practic însă, filamentul conţine porţiuni reci şi calde; în porţiunile calde se va evapora mai mult wolfram şi se va redepune mai puţin decît în porţiunile reci, în care fenomenul este inversat. Apare astfel un transfer axial de wolfram, care conduce în final la ruperea filamentului.

Lămpile cu vapori de iod au următoarele calităţi principale:

— fluxul luminos emis este practic constant de-a lungul întregii durate de funcţionare a lămpii, deoarece balonul este în permanenţă curat;

— dimensiunile lămpii sînt foarte mici în comparaţie cu cele ale lămpii normale de aceeaşi putere, realizîndu-se astfel o miniaturizare a lămpilor incandescente;

— durata de funcţionare (circa 2 000 ore) este cel puţin de două ori mai mare decît a lămpilor normale, iar eficacitatea luminoasă cu 30% mai mare (circa 25 lm/W);

— temperatura de culoare de 2 900°K permite o redare mai bună a culorilor obiectelor iluminate comparativ cu lămpile normale.

În tabela 2.5 sînt date caracteristicile lămpilor cu vapori de iod de fabricaţie Osram.

Lămpile cu vapori de iod (fig. 2.18) au în general două învelişuri tubulare, cel din interior din cuarţ, iar cel exterior din sticlă obişnuită; învelişul dublu este necesar pentru a se putea menţine balonul de cuarţ la o temperatură de circa 250°C, necesară formării iodurii de wolfram. Lampa trebuie să funcţioneze în poziţie strict orizontală pentru a se reduce la maximum transferul axial al wolframului.

Deoarece presiunea în interiorul lămpii este ridicată (760... 1 800 mm Hg), în momentul ruperii filamentului se produce un arc electric stabil; din acest motiv fiecare lampă cu vapori de iod va fi prevăzută cu o siguranţă fuzibilă de protecţie.

Lămpile cu vapori de iod se utilizează în instalaţiile de iluminat în care se cer fluxuri luminoase mari, produse de surse de dimensiuni mici: iluminatul terenurilor de sport, aeroporturilor, halelor industriale, pieţelor şi străzilor, iluminatul decorativ al monumentelor şi ca lămpi pentru farurile autovehiculelor.

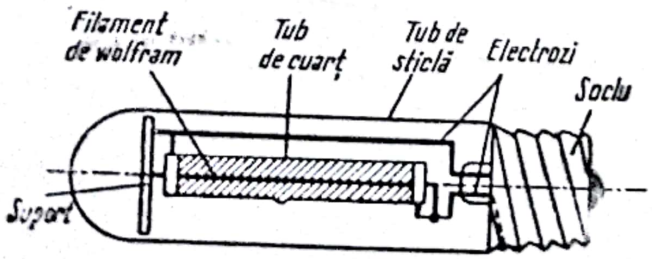


Fig. 2.18. Lampa cu vapori de iod.

Lămpi oglindate. La aceste lămpi, datorită formei balonului de sticlă, a geometriei zonei oglindate şi a calotei frontale refractoare se obţine o distribuţie relativ îngustă a fluxului luminos. Utilizarea acestor lămpi este indicată pentru iluminarea intensă a unor obiecte mici sau aflate la distanţe mai mari pe zone restrînse (de exemplu iluminarea vitrinelor, a unor firme sau obiecte de reclamă etc.).

Lămpi pentru proiectoare. Aceste lămpi au un filament compact şi de dimensiuni reduse, pentru a constitui o sursă cît mai punctiformă şi cu o luminanţă mare, pînă la 10^7 nt. Puterea acestor lămpi variază între 100 W şi 20 kW, durata de funcţionare fiind mai redusă decît la lămpile normale (100 ... 500 ore).

În afara lămpilor cu incandescenţă descrise mai sus se fabrică un număr mare de lămpi cu destinaţie specială pentru autovehicule, avioane, nave, vagoane, faruri şi semnalizări, lămpi rezistente la trepidaţii, pentru scopuri fotografice etc.

2.2.3. Radiaţiile descărcărilor în gaze sau vapori metalici

Eficacitatea luminoasă a lămpilor cu incandescenţă creşte cu temperatura (legea Stefan—Boltzmann), atingînd valoarea maximă de 91 lm/W la o temperatură de circa 6 500°K (pentru corpul negru); creşterea în continuare a temperaturii este însoţită de micşorarea eficacităţii luminoase (legea Wien-Planck). Deci eficacitatea luminoasă a lămpii cu incandescenţă este limitată chiar dacă ar exista metale care să reziste la temperaturi foarte ridicate.

Randamentul scăzut al lămpilor cu incandescenţă, precum şi culoarea radiaţiilor, diferită de culoarea luminii naturale, au determinat căutarea unor noi izvoare de lumină, bazate pe alte fenomene de radiaţie decît cele termice. Astfel s-a observat că descărcările electrice în gaze sau vapori metalici produc radiaţii luminoase (fenomenul de luminescenţă). Acest fenomen este strîns legat de structura atomică a atmosferei de descărcare şi se explică pe baza fizicii cuantice.

Luminescenţa gazelor sau vaporilor metalici. Să considerăm un tub de sticlă umplut cu un gaz sau vapori metalici în stare rarefiată (fig. 2.19), prevăzut la capete cu doi electrozi, cărora li se aplică o diferenţă de potenţial

$$U_l = U_0 - IR, \qquad (2.42)$$

U_0 fiind tensiunea sursei de curent continuu de alimentare, R — rezistor de stabilizare a descărcării legat în serie cu tubul, I — curentul care se stabileşte în acest circuit.

Dacă un atom al gazului este excitat, unii dintre electronii săi periferici vor trece de pe

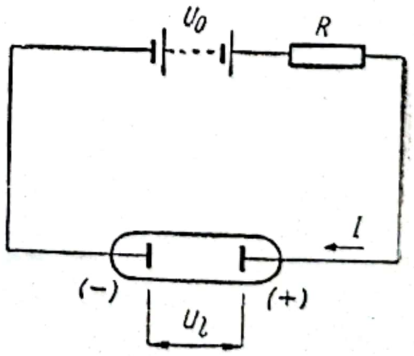


Fig. 2.19. Lampa cu descărcări în gaze sau vapori metalici alimentată în curent continuu

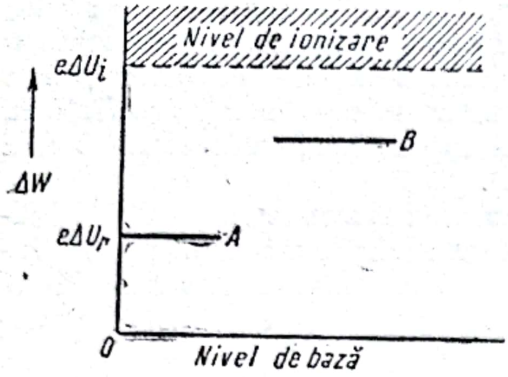


Fig. 2.20. Nivele energetice ale atomului.

nivelele energetice de bază pe unele dintre nivelele superioare posibile; la revenirea lor pe nivelul de bază, conform fizicii cuantice, atomul va elibera o cantitate de energie radiantă

$$\Delta W = e \cdot \Delta U = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \qquad (2.43)$$

în care e este sarcina electrică a electronului; ΔU — diferența de potențial a celor două nivele energetice; h — constanta lui Planck; ν și λ — frecvența, respectiv lungimea de undă a radiației emise; c — viteza luminii.

Excitarea atomului este posibilă în cazul ciocnirii sale cu un electron liber ce se deplasează în spațiul de descărcare spre anod, sub influența cîmpului electric. Dacă energia primită de unul dintre electronii atomului depășește energia de rezonanță $\Delta W_r = e.\ \Delta U_r$ (ΔU_r fiind tensiunea de rezonanță) corespunzătoare acelui nivel energetic superior nivelului de bază (nivelul A în fig. 2.20) de la care este posibilă revenirea electronului pe nivelul de bază, ciocnirea provoacă excitarea atomului. Prin revenirea electronului pe nivelul de bază apare o emisie de radiații, numite radiații de rezonanță. Dacă energia primită prin ciocnire depășește energia de ionizare $\Delta W_i = e \cdot \Delta U_i$ (ΔU_i fiind tensiunea de ionizare) atomul va pierde electronul respectiv, fiind astfel ionizat.

Electronii periferici pot ocupa după ciocnire și alte nivele de energie cuprinse între nivelul de rezonanță și cel de ionizare (de exemplu nivelul B), fie datorită energiei suficient de mare primite prin ciocnire, fie printr-o excitare în trepte, caz în care atomul este excitat înainte ca electronul deplasat pe nivelul A să se reîntoarcă pe nivelul de bază. Pentru a se obține excitarea în trepte se mărește probabilitatea ciocnirilor atomilor cu electronii liberi, prin creșterea presiunii gazului din tubul de descărcare.

Deoarece nivelele energetice superioare au anumite potențiale pentru fiecare element chimic în parte, radiațiile emise vor avea anumite lungimi de undă

$$\lambda = \frac{1239}{\Delta U} \ [\text{nm}], \qquad (2.44)$$

expresie rezultată din relația (2.43). Curba de repartiție spectrală a radiațiilor emise de descărcarea în gaze sau vapori metalici va fi discontinuă, cuprinzînd un număr oarecare de linii spectrale corespunzătoare diferitelor potențiale ale nivelelor energetice.

Luminescența gazelor sau vaporilor metalici este condiționată deci de:

— prezența electronilor liberi produși prin emisia catodului încălzit (emisie termoelectronică) și prin ionizarea (prin ciocnire) atmosferei de descărcare;

— excitarea atomilor gazului de către electronii liberi care se deplasează spre anod sub influenţa cîmpului electric stabilit între electrozi.

În cazul alimentării tubului de descărcare cu curent alternativ, cei doi electrozi ai tubului joacă pe rînd rolurile de catod şi de anod, fenomenele fiind identice cu cele în curent continuu.

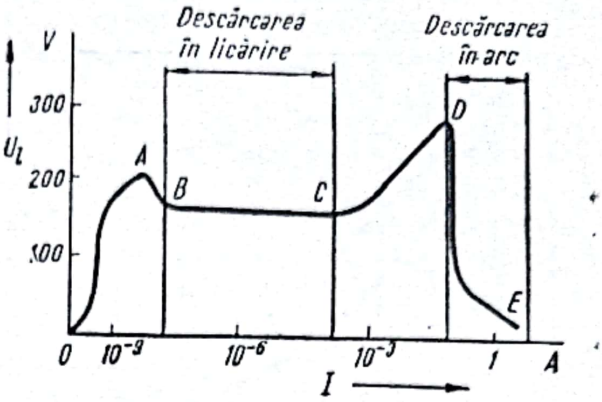


Fig. 2.21. Caracteristica tensiune — curent a descărcării în gaze sau vapori metalici.

Caracteristica tensiune U_l — *curent* I a descărcării în gaze sau vapori metalici este arătată în figura 2.21. În porţiunea OA, curentul electric are o valoare aproximativ constantă, datorită faptului că în afara electronilor liberi ai gazelor nu se mai produc alţi purtători de sarcină ; deoarece gazul nu emite radiaţii vizibile, această porţiune se numeşte zona descărcării întunecoase.

Valoarea atinsă de tensiune în punctul A — tensiunea de aprindere (amorsare), accelerează electronii liberi care vor acumula o energie cinetică suficientă pentru a provoca excitarea şi ionizarea atomilor de gaz. În urma ionizării prin ciocnire apar noi electroni, care, acceleraţi de cîmpul electric din tub, vor produce la rîndul lor ionizarea altor atomi de gaz, ş.a.m.d. Multiplicarea în progresie geometrică a numărului de electroni liberi dă naştere unei avalanşe de electroni, avînd ca urmare creşterea curentului electric de descărcare, la o valoare aproximativ constantă a tensiunii — porţiunea $ABCD$, numită zona descărcării în licărire sau luminescente, deoarece descărcarea este însoţită de emisia radiaţiilor luminoase, localizate în mai multe zone luminoase alternate cu zone întunecate (figura 2.22). Porţiunea BC a acestei zone de descărcare este utilizată pentru lămpile cu descărcări în regim de licărire folosind lumina catodică şi pentru tuburile cu descărcări în regim de licărire folosind coloana luminoasă pozitivă.

Mărirea în continuare a tensiunii pe tub determină o creştere masivă a numărului ionilor pozitivi care, căzînd pe catod, îi cedează acestuia energia cinetică acumulată. Temperatura catodului creşte mult şi favorizează emisia termoelectronică. Punctul D marchează trecerea de la descăr-

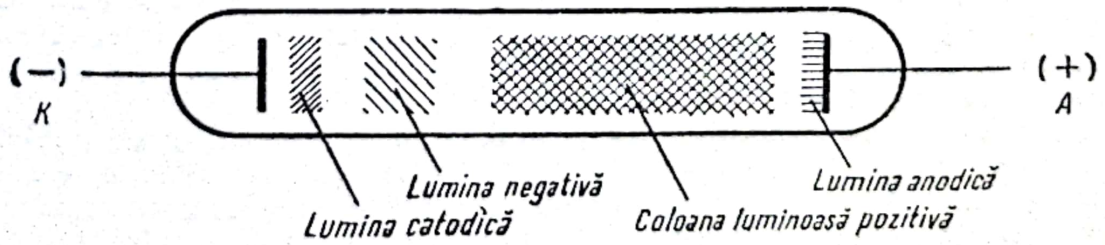


Fig. 2.22. Zonele luminoase ale descărcării luminescente.

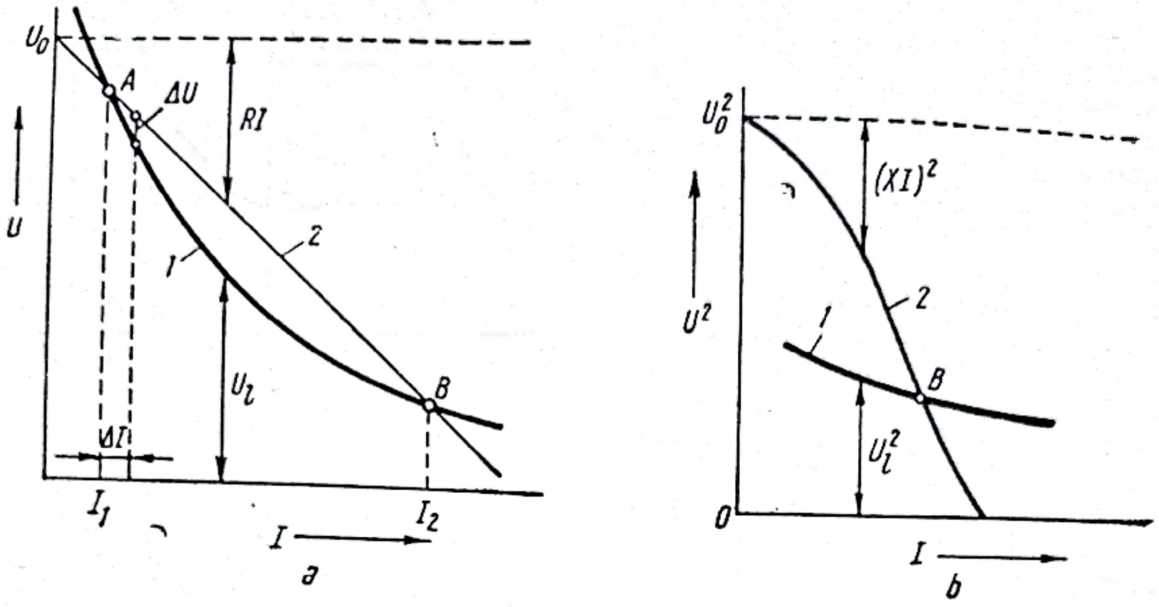


Fig. 2.23. Stabilizarea descărcării în arc:
a — balast rezistiv; *b* — balast inductiv.

carea luminescentă la descărcarea în arc, în care emisia termoelectronică a catodului joacă un rol deosebit de important. Zona descărcării în arc *DE* se caracterizează printr-o scădere pronunţată a tensiunii pe tub, pe măsură ce creşte curentul de descărcare. În această zonă se situează punctul de funcţionare al lămpilor cu descărcări în vapori metalici şi al lămpilor cu arc.

Stabilizarea descărcării în arc. Datorită caracteristicii negative a descărcării electrice în gaze sau vapori metalici, curentul care străbate lampa are tendinţa de a creşte nelimitat, conducînd la distrugerea lămpii. Pentru a împiedica această creştere a curentului, lămpile cu descărcări sînt prevăzute cu elemente de stabilizare a regimului de funcţionare, numite balasturi, formate din rezistoare, bobine, condensatoare, combinaţii ale acestora sau transformatoare cu reactanţă de scăpări mărită.

În figura 2.23, *a* este reprezentat modul de stabilizare al descărcării în arc într-o lampă alimentată în curent continuu (fig. 2.19) utilizînd un rezistor legat în serie.

Curba *1* reprezintă caracteristica tensiune-curent a lămpii, iar curba 2-caracteristica tensiune-curent a rezistorului *R*. Funcţionarea schemei este posibilă în punctele *A* şi *B*, în care cele două caracteristici se intersectează, suma tensiunilor U_l şi RI trebuind să fie egală cu tensiunea U_0 a sursei de alimentare (rel. 2.42).

Funcţionarea în punctul *A* este instabilă, deoarece o dată cu creşterea curentului de descărcare I_1 cu o valoare ΔI, lămpii i se aplică o tensiune suplimentară ΔU care provoacă creşterea în continuare a curentului şi deplasarea punctului de funcţionare în *B*; la scăderea curentului I_1, $U_l + RI > U_0$ şi lampa se va stinge.

Punctul B corespunde funcţionării stabile a ansamblului lampă-rezistor, deoarece la o eventuală depăşire a curentului I_2, tensiunea de alimentare va fi mai mică decît cea necesară stabilităţii arcului şi punctul de funcţionare tinde să revină în B.

Prin mărirea valorii rezistenţei sau prin micşorarea tensiunii de alimentare lampa se va stinge în momentul în care cele două caracteristici nu se vor mai intersecta ; micşorînd valoarea rezistenţei sau mărind tensiunea de alimentare, punctul de funcţionare stabilă se va deplasa spre curenţi de descărcare mai mari, ceea ce duce la majorarea pierderilor în rezistor şi la micşorarea duratei de funcţionare a lămpii prin arderea electrozilor. Asigurarea unui punct de funcţionare stabilă a lămpilor cu descărcări în gaze sau vapori metalici urmărindu-se şi aspectul economic, se poate realiza deci prin dimensionarea corespunzătoare a balasturilor.

În cazul alimentării lămpii cu curent alternativ, stabilizarea descărcării se realizează în punctul B (fig. 2.23, *b*) de intersecţie al caracteristicii tensiune-curent a lămpii *1* cu cea a balastului inductiv *2* legat în serie cu lampa, punct în care se realizează condiţia (aproximativă)

$$U_l^2 + (XI)^2 = U_0^2, \tag{2.45}$$

X fiind reactanţa balastului. Caracteristicile tensiune-curent au fost reprezentate cu ajutorul valorilor eficace ale acestor mărimi.

Amorsarea descărcării în arc. Descărcarea electrică în gaze sau vapori metalici se declanşează numai atunci cînd emisia termoelectronică a catodului este însoţită de existenţa unui cîmp electric puternic, obţinut prin aplicarea unei tensiuni ridicate sau prin utilizarea unor metode speciale de amorsare. Dintre metodele de amorsare se menţionează :

— utilizarea electrozilor auxiliari de amorsare, aşezaţi în apropierea electrozilor principali ;

— preîncălzirea electrozilor, urmată de aplicarea unei tensiuni mărite obţinute cu ajutorul unui dispozitiv de amorsare numit starter ;

— depunerea unei benzi metalizate în exteriorul sau interiorul tubului de sticlă, bandă legată la unul dintre electrozi, avînd rolul de a mări cîmpul electric din lampă;

— utilizarea unui transformator ridicător avînd o reactanţă de scăpări importantă şi deci o tensiune de mers în gol suficient de mare pentru amorsarea descărcării.

2.2.4. Lămpi cu descărcări în gaze sau vapori metalici

Ţinînd seama de caracteristica tensiune-curent a descărcării electrice într-un tub umplut cu un gaz rar (inert) sau cu vapori metalici, lămpile se pot clasifica în :

— lămpi cu descărcări în regim de licărire, folosind lumina catodică ;

— tuburi cu descărcări în regim de licărire, folosind coloana luminoasă pozitivă ;

Scanned with OKEN Scanner

— lămpi cu descărcări în arc, cu vapori metalici (mercur, sodiu, thaliu, indiu etc.) sau gaze (xenon).

Lămpi cu descărcări în regim de licărire, folosind lumina catodică. La aceste lămpi, descărcarea are loc într-o atmosferă gazoasă formată din neon şi heliu la o presiune de 5 ... 25 mmHg. Lumina este produsă de licărirea negativă concentrată în jurul catodului; prin apropierea electrozilor de fier (aluminiu) la o distanţă de aproximativ un milimetru, coloana pozitivă este înlăturată.

Caracteristicile acestor lămpi sînt: tensiune constantă de funcţionare, independentă de intensitatea curentului; nu au practic inerţie luminoasă, intensitatea luminoasă urmărind fidel orice variaţie a curentului; funcţionează în curent continuu sau alternativ; puterea este de 1 ... 3W la tensiunea de 120—220 V; fluxul luminos este de ordinul a 1 lm; durata de funcţionare este de 1 000 ... 2 000 ore.

Lămpile cu licărire se utilizează pentru semnalizare, control şi sincronizare în circuitele secundare ale instalaţiilor electrice, în aparatele care utilizează efectul stroboscopic şi ca stabilizatoare de tensiune la puteri mici.

Tuburi cu descărcări în regim de licărire, folosind coloana luminoasă pozitivă. Pentru reclame luminoase şi uneori pentru iluminatul decorativ se utilizează tuburi cu descărcări în regim de licărire, la care coloana luminoasă pozitivă ocupă întreg tubul şi prezintă o strălucire uniformă pe toată lungimea sa. Tubul de descărcare din sticlă, avînd o lungime de cîţiva metri şi un diametru de circa 10 ... 30 mm, este prevăzut cu electrozi reci fixaţi la capete; tuburile sînt umplute cu gaz la presiuni de 1 ... 10 mm Hg.

Caracteristicile energetice, colorimetrice şi fotometrice ale tuburilor luminoase depind de lungimea şi diametrul tubului, de natura şi presiunea gazului.

Tensiunea U_l aplicată tubului se compune din căderea de tensiune U_e pe electrozi şi căderea de tensiune în coloana pozitivă

$$U_l = U_e + E \cdot l, \tag{2.46}$$

în care E este intensitatea cîmpului electric din tub, iar l-lungimea tubului. Tensiunea U_e depinde de natura electrozilor şi a gazului de umplere, avînd valori între 100 şi 200 V. Valoarea cîmpului E depinde de natura gazului (pentru neon $E = 3 \ldots 4$ V/cm, pentru mercur $E = 2{,}1 \ldots 2{,}9$ V/cm), de diametrul tubului şi de intensitatea curentului.

Culoarea radiaţiei luminoase depinde de natura gazului folosit (în cazul neonului se obţine culoare roşie — portocalie, a heliului — culoarea galbenă, a amestecului argon cu vapori de mercur — culoarea albastră), de diametrul şi culoarea sticlei tubului, de stratul fluorescent depus pe tub.

Eficacitatea luminoasă variază între 2 şi 18 lm/W, iar durata de funcţionare este foarte mare, atingînd 5 000 de ore.

Pentru amorsarea descărcării este necesară o tensiune cu 25 ... 30% mai mare decît tensiunea normală de funcţionare. Tensiunea de amorsare este cuprinsă între 400 şi 2 000 V pentru fiecare metru de tub şi depinde de lungimea şi diametrul tubului, de natura şi presiunea gazului.

Scanned with OKEN Scanner

Alimentarea tuburilor luminoase şi stabilizarea descărcării se realizează cu ajutorul unui transformator de înaltă tensiune (0,22/1 ... 6 kV) avînd reactanţa de scăpări mărită. Tensiunea de mers în gol a acestor transformatoare este cu circa 50% mai mare decît cea nominală, asigurînd în acest mod amorsarea descărcării.

Lămpi cu vapori de mercur. Folosirea radiaţiilor descărcărilor în arc în gaze sau vapori metalici pentru aplicaţii practice impune alegerea unor medii de descărcare care să asigure o eficacitate luminoasă cît mai ridicată a lămpii. Un asemenea mediu de descărcare îl constituie mercurul sub formă de vapori.

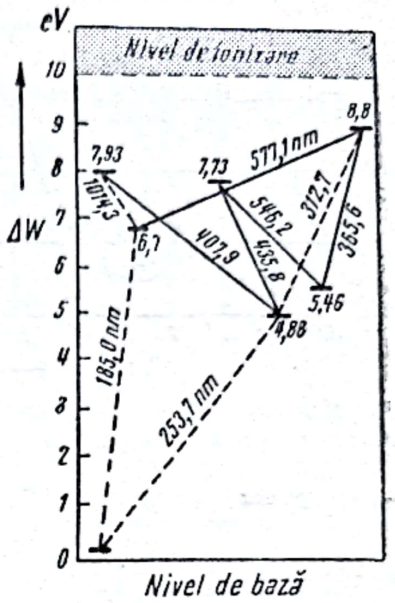


Fig. 2.24. Principalele nivele energetice ale atomului de mercur şi lungimile de undă ale radiaţiilor emise:
— radiaţii vizibile; — — radiaţii înafara spectrului vizibil.

Principalele nivele energetice ale atomului de mercur sînt reprezentate în figura 2.24. Atomul de mercur posedă două nivele de rezonanţă $\Delta W_{r1} = 4{,}88$ eV şi $\Delta W_{r2} = 6{,}7$ eV; din figură se observă că radiaţiile de rezonanţă ($\lambda = 185$ nm şi $\lambda = 253{,}7$ nm) sînt înafara spectrului vizibil. Pentru a se obţine radiaţii vizibile se măreşte presiunea vaporilor de mercur în scopul favorizării excitării în trepte. Repartiţia spectrală a radiaţiilor emise de descărcarea în vapori de mercur (fig. 2.25) indică apariţia de noi radiaţii vizibile o dată cu mărirea presiunii. Curba de variaţie a eficacităţii lumi-

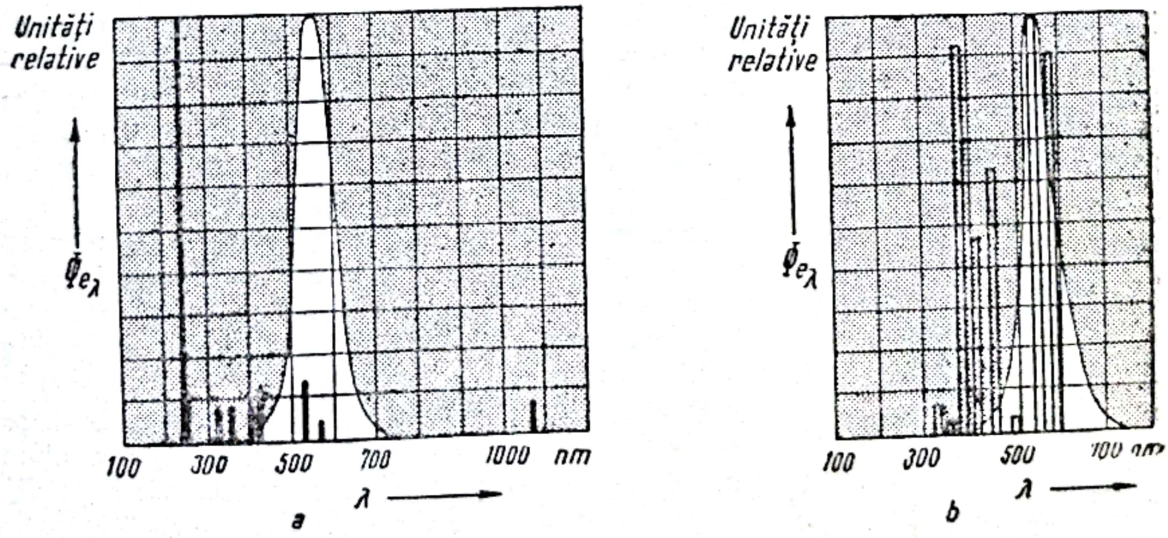


Fig. 2.25. Repartiţia spectrală a radiaţiilor descărcării în vapori de mercur:
a — la joasă presiune; *b* — la înaltă presiune.

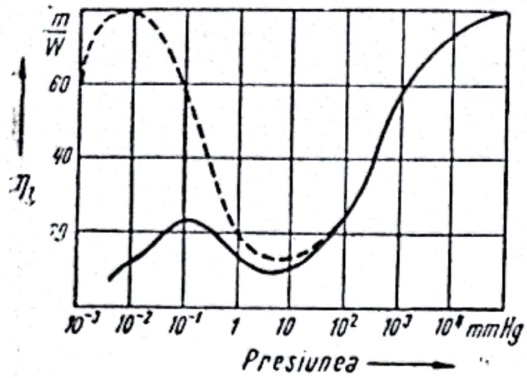


Fig. 2.26. Eficacitatea luminoasă η_l în funcţie de presiune la lămpile cu vapori de mercur:

— cu balon clar din sticlă de cuarţ; — — — cu balon fluorescent.

noase cu presiunea (fig. 2.26) prezintă un maxim în domeniul presiunilor joase 0,01 ... 1 mm Hg, un minim pentru presiunile medii, pentru ca apoi să crească continuu la presiuni înalte de 1 ... 10 atmosfere sau foarte înalte, de 20 ... 200 atmosfere.

Conţinutul ridicat de radiaţii ultraviolete ($\lambda = 180 \ldots 400$ nm) al spectrului de emisie a determinat folosirea *lămpilor de joasă presiune cu balon clar* pentru sterilizarea aerului, apei şi alimentelor, pentru analiza luminescentă a materialelor textile şi a produselor agricole, pentru tratamentul antirahitic al organismelor vii şi pentru aparate de heliograf; aceste lămpi nu se utilizează în tehnica iluminatului.

Lampa cu vapori de mercur de înaltă presiune (fig. 2.27) se compune din tubul de descărcare *1* din cuarţ, electrozii principali *2*, electrodul auxiliar de amorsare *3* şi balonul de sticlă *5*, necesar pentru izolarea termică faţă de mediul ambiant a tubului de descărcare şi pentru a permite manipularea lămpii (sticla de cuarţ se devitrifică sub acţiunea transpiraţiei mîinilor). Electrodul auxiliar este montat în apropierea unuia dintre electrozii principali şi legat la celălalt electrod principal printr-un rezistor de grafit *4*, ce limitează curentul la cîţiva miliamperi, suficienţi pentru ionizarea iniţială a atmosferei de argon şi mercur din tub. Mercurul aflat în stare lichidă se evaporă şi presiunea vaporilor creşte cu mărirea temperaturii pînă cînd, în funcţie de caracteristicile balastului, descărcarea se stabilizează (după aproximativ 4—5 minute de la amorsare); argonul din tub constituie un purtător al descărcării iniţiale dintre un electrod principal şi electrodul auxiliar. Reaprinderea lămpii este posibilă numai după răcirea ei în circa opt minute, deoarece tensiunea aplicată poate amorsa descărcarea numai după scăderea presiunii şi a temperaturii sub o anumită valoare.

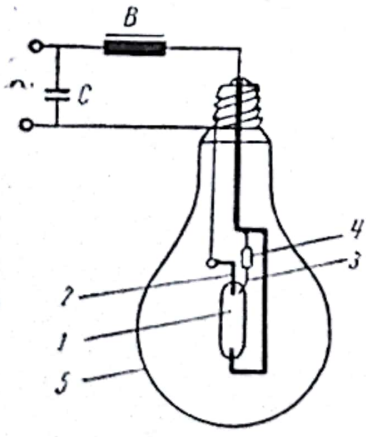


Fig. 2.27. Lampă cu vapori de mercur de înaltă presiune:

B — balast inductiv; *C* — condensator pentru îmbunătăţirea factorului de putere.

Caracteristicile lămpilor cu vapori de mercur de înaltă presiune sînt trecute în tabela 2.6. Durata de funcţionare a acestor lămpi este de 1 000 ... 2 000 ore, iar luminanţa este de (2000 ... 1 000) · 10^4 nt.

Conectarea lămpilor la reţeaua de alimentare se face prin intermediul unui balast inductiv, prevăzut cu condensatoare pentru îmbunătăţirea factorului de putere.

Aceste lămpi se utilizează în iluminatul exterior şi în acele situaţii în care nu se cere o redare

corectă a culorilor, deoarece radiaţiile emise au o culoare verde — albăstruie ($T_c = 7\,000$°K), lipsind radiaţiile roşii. Corectarea compoziţiei spectrale se obţine prin: depunerea unui strat fluorescent pe peretele balonului de sticlă (lămpile fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune — § 2.2.5); combinarea cu lămpi cu incandescenţă (lămpile cu vapori de mercur de înaltă presiune cu lumină mixtă); introducerea iodurilor metalice în mediul de descărcare (lămpile cu vapori de mercur de înaltă presiune cu ioduri metalice).

Tabela 2.6

Caracteristicile lămpilor cu vapori de mercur de înaltă presiune cu balon mat (OSRAM), de 220 V

Puterea nominală W	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
80	3 000	37
125	5 400	43
250	11 500	46
400	20 500	51
700	37 000	53
1000	52 000	52
2000	130 000	65

Lămpile cu vapori de mercur de înaltă presiune cu lumină mixtă. Lampa reprezentată în figura 2.28 este de construcţie obişnuită, avînd însă balastul inductiv înlocuit print-un filament de wolfram montat în interiorul balonului de sticlă. Filamentul stabilizează descărcarea şi constituie un izvor de lumină incandescentă care îmbunătăţeşte compoziţia spectrală a lămpii cu vapori de mercur.

Lămpile cu lumină mixtă se utilizează pentru iluminatul căilor rutiere şi a halelor industriale, cînd sînt necesare fluxuri concentrate de ordinul a 10 000 ... 20 000 lm, eficacităţi luminoase superioare celor ale lămpilor cu incandescenţă folosite singure şi asigurarea unei redări favorabile a culorilor.

Pentru obţinerea unei eficacităţi luminoase ridicate (20 ... 25 lm/W), raportul dintre fluxul luminos emis de tubul de descărcare şi cel emis de filamentul incandescent trebuie să fie aproximativ 1 : 1; pentru a se obţine acest raport, puterea electrică preluată de filament va reprezenta circa 60% din puterea totală absorbită. Astfel o lampă cu vapori de mercur de 10 000 lm, combinată cu o lampă cu incandescenţă de 500 W şi 8 000 lm, realizează un flux total de 18 000 lm, la un consum de 780 W.

Lămpi cu vapori de mercur de înaltă presiune cu adaos de ioduri metalice. Prin introducerea unui amestec de ioduri de sodiu, thaliu şi indiu în anumite proporţii în tubul de descărcare al unei lămpi cu vapori de mercur, lumina emisă va avea o culoare apropiată de lumina zilei ($T_c = 5\,500$°K).

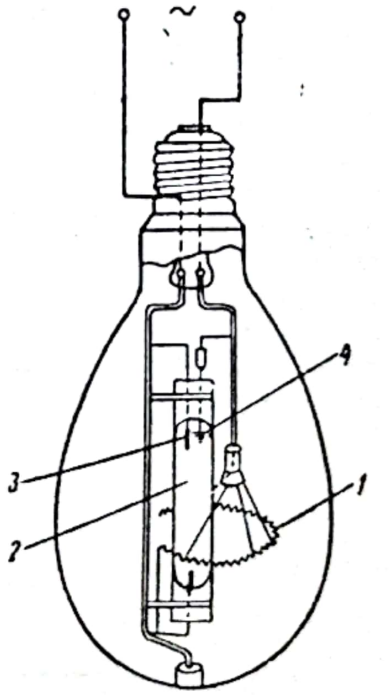


Fig. 2.28. Lampă cu vapori de mercur de înaltă presiune cu lumină mixtă:
1 — filament incandescent; *2* — tub de cuarţ; *3* — electrozi principali; *4* — electrod auxiliar.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.7

Caracteristicile lămpilor cu vapori de mercur de înaltă presiune şi ioduri metalice (OSRAM).

Puterea nominală W	Tensiunea de alimentare V	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
100	220	6 000	60
160		11 500	72
250		19 500	78
400		34 000	85
700		63 000	90
1000	380	95 000	95
2000		200 000	100

La temperatura ridicată a arcului electric, iodurile se disociază; atomii iodului şi ai metalelor respective fiind excitaţi, vor emite radiaţii luminoase caracteristice, avînd culori complementare radiaţiilor mercurului. Venind în contact cu pereţii reci ai tubului de descărcare, iodul şi metalele se recombină, ciclul reluîndu-se de la început.

O caracteristică importantă a acestor lămpi este posibilitatea de obţinere a unor fluxuri luminoase avînd diferite culori, prin modificarea cantităţilor de ioduri metalice şi a geometriei tubului de descărcare.

Caracteristicile unor astfel de lămpi sînt date în tabela 2.7.

Aceste lămpi se utilizează în special la iluminatul spaţiilor mari, deschise.

Lămpi cu vapori de mercur de foarte înaltă presiune. Pentru creşterea eficacităţii luminoase şi a luminanţei, s-a căutat să se realizeze valori ridicate pentru intensitatea cîmpului electric, mărind presiunea vaporilor de mercur şi micşorînd dimensiunile tubului de descărcare. La presiuni de 20 ... 200 at s-au obţinut eficacităţi luminoase de 40 ... 60 lm/W şi luminanţe de (10 000 ... 100 000) · 10^4 nt, ceea ce a permis utilizarea acestor lămpi pentru iluminatul cu proiectoare al spaţiilor întinse: căi ferate, aeroporturi, terenuri sportive etc.

Lămpi cu vapori de sodiu. În tubul de descărcare în formă de U (fig. 2.29, *a*) se introduce sodiu şi neon sau argon. Descărcarea începe în atmosfera de neon şi, o dată cu creşterea temperaturii, va continua în vaporii de sodiu. Lampa intră în regim normal de funcţionare după 5 ... 10 minute de la punerea sub tensiune. Vaporii de sodiu la o presiune de (4 ... 9) · 10^{-3} mm Hg şi o temperatură de 270°C emit radiaţii luminoase de culoare galbenă,

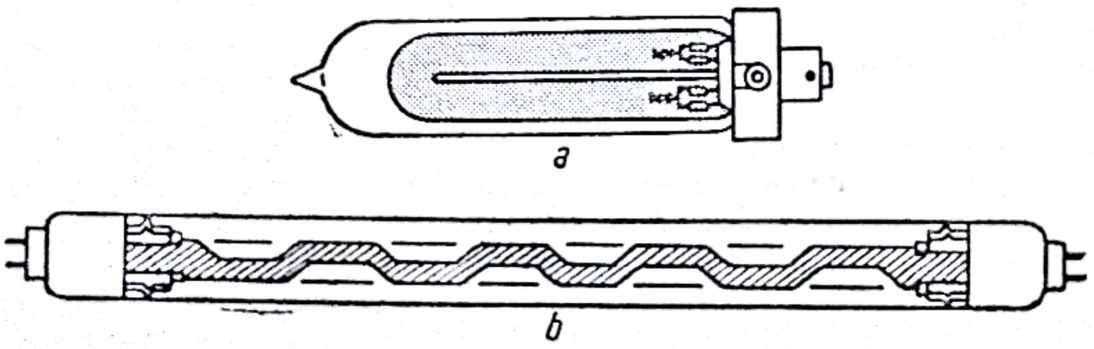


Fig. 2.29. Lampă cu vapori de sodiu:
a — în formă de U; *b* — liniară.

avînd lungimea de undă de 589 şi 589,6 nm. Pentru a asigura regimul termic necesar emiterii radiaţiilor luminoase, tubul de descărcare se introduce într-un cilindru protector de sticlă, golit de aer; acest tip de lampă poate funcţiona în orice poziţie.

Electrozii lămpii pot fi reci (aprinderea realizîndu-se cu ajutorul unui electrod auxiliar) sau calzi (aprinderea fiind asigurată de un starter — § 2.2.5). Stabilizarea descărcării se obţine cu un balast inductiv.

Lampa cu vapori de sodiu pentru puteri mai mari de 200 W se execută sub formă liniară (fig. 2.29, *b*) cu electrozi reci sau calzi. Tubul de descărcare este gîtuit din loc în loc, pentru a se evita deplasarea vaporilor de sodiu spre zonele avînd temperaturi mai ridicate (electrozii). Acest tip de lampă se alimentează printr-un transformator cu reactanţă de scăpări mărită (tensiunea de amorsare 340 ... 660 V) şi poate funcţiona numai în poziţie orizontală.

Caracteristicile lămpilor cu vapori de sodiu sînt trecute în tabela 2.8. Durata de funcţionare este de 2 000 ... 3 000 ore.

Lumina galbenă emisă de lampa cu vapori de sodiu este foarte selectivă, influenţînd favorabil perceperea contrastelor şi a formelor; această proprietate nu permite însă distingerea suficientă a culorii obiectelor ci numai diferenţa de luminanţă.

Eficacitatea luminoasă ridicată şi proprietăţile favorabile ale luminii monocromatice a sodiului au făcut ca aceste lămpi să fie utilizate în locurile în care este necesară o percepţie mărită, fără a fi necesară o redare corectă a culorilor, şi anume: iluminatul public, iluminatul halelor de turnătorie şi forjă, iluminatul decorativ etc.

La lămpile cu vapori de sodiu de înaltă presiune—200 mmHg, culoarea luminii emise este mult ameliorată, spectrul de radiaţie cuprinzînd şi zona verde-roşu. Pentru a rezista la acţiunea corozivă intensă a vaporilor de sodiu, tubul de descărcare al acestor lămpi este realizat din alumină sinterizată translucidă. O astfel de lampă avînd o putere nominală de 400 W, emite un flux luminos de 40 000 lm, prezentînd o redare foarte bună a culorilor.

Lămpi cu xenon. Lămpile cu xenon se fabrică în două forme constructive: lămpi cu arc scurt şi lămpi cu arc lung. Lămpile cu arc scurt, avînd o putere între 150 şi 2 500 W, constau dintr-un balon din sticlă de cuarţ cu pereţi groşi, electrozii de wolfram fiind dispuşi la distanţă mică unul faţă de celălalt (fig. 2.30, *a*). Balonul este umplut cu xenon la presiuni pînă la 50 at. Lămpile cu arc lung (distanţă între electrozi 500 ... 1 500 mm) sînt lămpi de mare putere, 1 ... 65 kW, de formă tubulară (fig. 2.30, *b*), presiunea xenonului din lampă atingînd 10 at. Prin-

Tabela 2.8

Caracteristicile lămpilor cu vapori de sodiu (OSRAM) de 220 V

Puterea nominală W	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
45	3 300	73
60	5 000	83
85	8 000	94
140	13 000	93
200	21 500	107
220	26 500	120

Scanned with OKEN Scanner

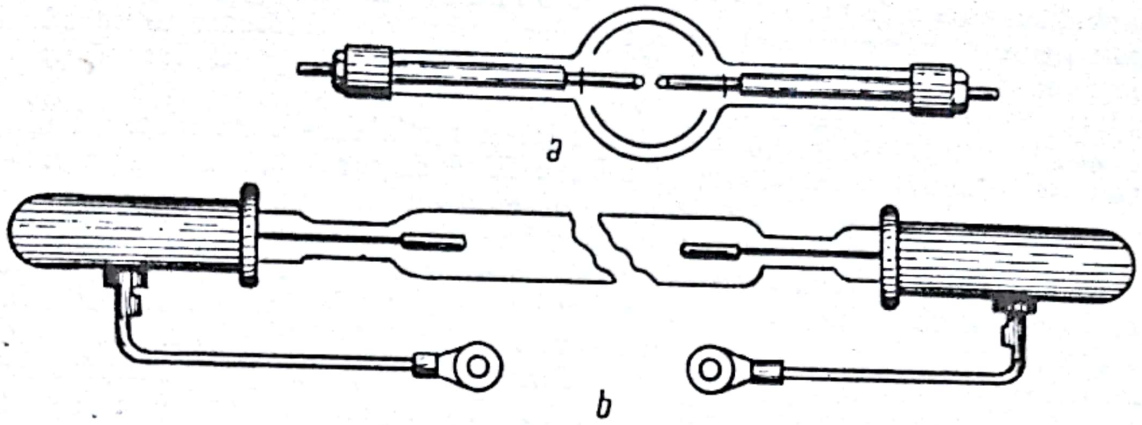


Fig. 2.30. Lampă cu xenon:
a — cu arc scurt; *b* — cu arc lung.

cipalele caracteristici ale acestui tip de lampă cu xenon sînt date în tabela 2.9.

Lămpile cu xenon cu arc lung obţin o utilizare din ce în ce mai largă în iluminatul cu proiectoare al spaţiilor mari: terenuri de sport, pieţe publice, aeroporturi, triaje etc. Aceste lămpi se caracterizează prin luminanţe mari şi printr-o compoziţie spectrală foarte apropiată de lumina zilei (T_c = = 6 000 ... 6 300°K).

Pentru amorsarea descărcării în arc este necesar un impuls de tensiune de circa 60 ... 80 kV, obţinut cu ajutorul unui starter special (fig. 2.31), prin descărcarea unor condensatoare de înaltă tensiune printr-un eclator. Pentru a se evita suprasolicitarea starterului, acesta este pus în funcţiune un timp scurt (maximum 0,5 s) de către un întreruptor automat cu acţionare rapidă.

Pentru stabilizarea funcţionării lămpilor cu xenon se utilizează un ba-

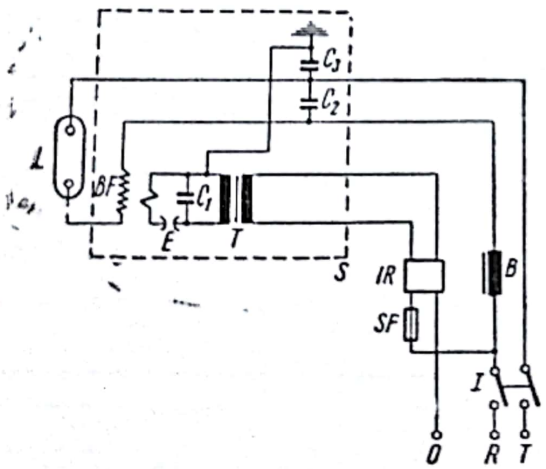


Fig. 2.31. Schemă de conectare la reţea a lămpii cu xenon:
L — lampa; *S* — starter; *E* — eclator; *BF* — bobină de înaltă frecvenţă; *T* — transformator de înaltă tensiune; C_1 — condensator de înaltă tensiune; C_2 — condensator de cuplaj; C_3 — condensator de legare la masă; *B* — balast inductiv; *IR* — întreruptor automat rapid; *SF* — siguranţă fuzibilă lentă; *I* — întreruptor.

Tabela 2.9

Caracteristicile lămpilor cu xenon cu arc lung (OSRAM)

Puterea nominală W	Tensiunea de alimentare V	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
6 000	220	140 000	23
10 000	220	250 000	25
20 000	380	500 000	25
65 000	380	2 000 000	35

last inductiv, deşi caracteristica curent-tensiune a acestor surse luminoase prezintă o alură ascendentă în zona curenţilor mari (începînd de la 25 A, pentru lampa de 10 kW).

Lămpi cu arc şi cu electrozi de cărbune. Arcul electric de curent continuu produs între electrozi de cărbune pur constituie un izvor de mare luminanţă-pînă la 120 000 · 10^4 nt în regim permanent şi 180.000 · 10^4 nt pentru un timp scurt. De remarcat că luminanţa medie a soarelui este de 160.000 · 10^4 nt.

Pentru a obţine un arc stabil este necesar să se monteze în circuitul lămpii un rezistor adiţional; în prezent s-au construit transformatoare şi redresoare cu caracteristici coborîtoare (§ 4.2.2), care permit o bună funcţionare a lămpii fără a întrebuinţa rezistorul adiţional.

Lămpile cu arc şi cu electrozi de cărbune se utilizează în aparatele de proiecţie, cinematografie etc.

2.2.5. Lămpi fluorescente

În scopul măririi eficacităţii luminoase a lămpilor cu descărcări în gaze şi vapori metalici şi în vederea modificării culorii şi a compoziţiei spectrale a luminii radiate, se folosesc substanţe fluorescente (luminofori). Aceste substanţe: iradiate cu radiaţii ultraviolete produse de descărcarea electrică în vapori de mercur, absorb energia incidentă şi o reemit sub formă de radiaţie vizibilă, deci cu schimbarea lungimii de undă (fig. 2.32).

Substanţele fluorescente sînt depuse sub formă de pulbere, pe peretele interior al tubului de descărcare la lămpile fluorescente cu vapori de mercur de joasă presiune (cunoscute sub denumirea de *lămpi fluorescente tubulare* sau *tuburi fluorescente*), sau al balonului exterior de protecţie — la lămpile fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune.

Luminoforul se prepară dintr-o substanţă de bază (oxizi metalici) şi un activator (pămînturi rare). Combinînd mai mulţi luminofori în proporţii diferite se obţin culori de nuanţe diferite.

a. **Tuburi fluorescente.** Aceste lămpi se execută în general sub forma unui cilindru drept, avînd diferite diametre şi lungimi, în funcţie de puterea absorbită. La capetele tubului de sticlă sînt montaţi electrozii calzi, constînd dintr-un filament de wolfram spiralat. În tuburile fluorescente se introduce argon şi mercur; la temperatura de 40 ... 50°C a pereţilor tubului şi la presiunea optimă de 0,01 mmHg, vaporii de mercur

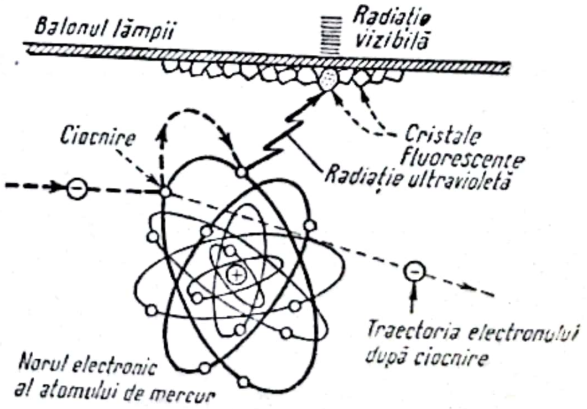


Fig. 2.32. Producerea luminii în lampa fluorescentă.

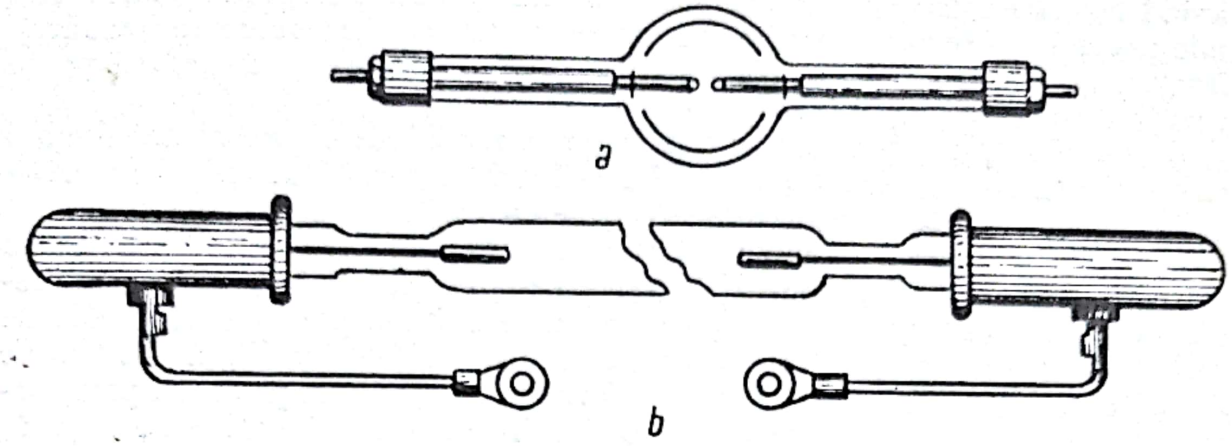


Fig. 2.30. Lampă cu xenon:
a — cu arc scurt; *b* — cu arc lung.

cipalele caracteristici ale acestui tip de lampă cu xenon sînt date în tabela 2.9.

Lămpile cu xenon cu arc lung obţin o utilizare din ce în ce mai largă în iluminatul cu proiectoare al spaţiilor mari: terenuri de sport, pieţe publice, aeroporturi, triaje etc. Aceste lămpi se caracterizează prin luminanţe mari şi printr-o compoziţie spectrală foarte apropiată de lumina zilei (T_c = = 6 000 ... 6 300°K).

Pentru amorsarea descărcării în arc este necesar un impuls de tensiune de circa 60 ... 80 kV, obţinut cu ajutorul unui starter special (fig. 2.31), prin descărcarea unor condensatoare de înaltă tensiune printr-un eclator. Pentru a se evita suprasolicitarea starterului, acesta este pus în funcţiune un timp scurt (maximum 0,5 s) de către un întreruptor automat cu acţionare rapidă.

Pentru stabilizarea funcţionării lămpilor cu xenon se utilizează un ba-

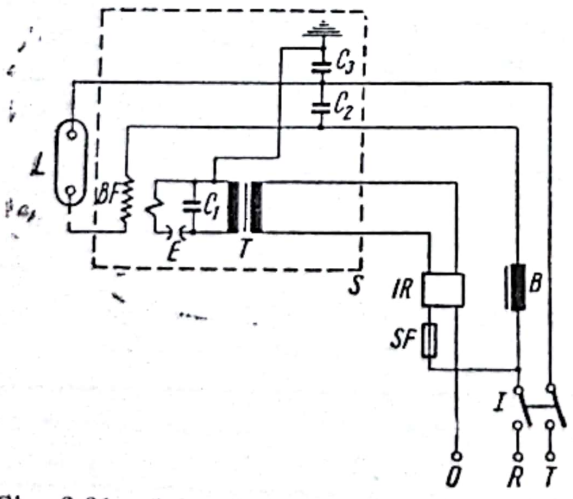


Fig. 2.31. Schemă de conectare la reţea a lămpii cu xenon:
L — lampa; *S* — starter; *E* — eclator; *BF* — bobină de înaltă frecvenţă; *T* — transformator de înaltă tensiune; C_1 — condensator de înaltă tensiune; C_2 — condensator de cuplaj; C_3 — condensator de legare la masă; *B* — balast inductiv; *IR* — întreruptor automat rapid; *SF* — siguranţă fuzibilă lentă; *I* — întreruptor.

Tabela 2.9

Caracteristicile lămpilor cu xenon cu arc lung (OSRAM)

Puterea nominală W	Tensiunea de alimentare V	Fluxul luminos lm	Eficacitatea luminoasă lm/W
6 000	220	140 000	23
10 000	220	250 000	25
20 000	380	500 000	25
65 000	380	2 000 000	35

last inductiv, deşi caracteristica curent-tensiune a acestor surse luminoase prezintă o alură ascendentă în zona curenţilor mari (începînd de la 25 A, pentru lampa de 10 kW).

Lămpi cu arc şi cu electrozi de cărbune. Arcul electric de curent continuu produs între electrozi de cărbune pur constituie un izvor de mare luminanţă-pînă la 120 000 · 10^4 nt în regim permanent şi 180.000 · 10^4 nt pentru un timp scurt. De remarcat că luminanţa medie a soarelui este de 160.000 · 10^4 nt.

Pentru a obţine un arc stabil este necesar să se monteze în circuitul lămpii un rezistor adiţional; în prezent s-au construit transformatoare şi redresoare cu caracteristici coborîtoare (§ 4.2.2), care permit o bună funcţionare a lămpii fără a întrebuinţa rezistorul adiţional.

Lămpile cu arc şi cu electrozi de cărbune se utilizează în aparatele de proiecţie, cinematografie etc.

2.2.5. Lămpi fluorescente

În scopul măririi eficacităţii luminoase a lămpilor cu descărcări în gaze şi vapori metalici şi în vederea modificării culorii şi a compoziţiei spectrale a luminii radiate, se folosesc substanţe fluorescente (luminofori). Aceste substanţe: iradiate cu radiaţii ultraviolete produse de descărcarea electrică în vapori de mercur, absorb energia incidentă şi o reemit sub formă de radiaţie vizibilă, deci cu schimbarea lungimii de undă (fig. 2.32).

Substanţele fluorescente sînt depuse sub formă de pulbere, pe peretele interior al tubului de descărcare la lămpile fluorescente cu vapori de mercur de joasă presiune (cunoscute sub denumirea de *lămpi fluorescente tubulare* sau *tuburi fluorescente*), sau al balonului exterior de protecţie — la lămpile fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune.

Luminoforul se prepară dintr-o substanţă de bază (oxizi metalici) şi un activator (pămînturi rare). Combinînd mai mulţi luminofori în proporţii diferite se obţin culori de nuanţe diferite.

a. **Tuburi fluorescente.** Aceste lămpi se execută în general sub forma unui cilindru drept, avînd diferite diametre şi lungimi, în funcţie de puterea absorbită. La capetele tubului de sticlă sînt montaţi electrozii calzi, constînd dintr-un filament de wolfram spiralat. În tuburile fluorescente se introduce argon şi mercur; la temperatura de 40 ... 50°C a pereţilor tubului şi la presiunea optimă de 0,01 mmHg, vaporii de mercur

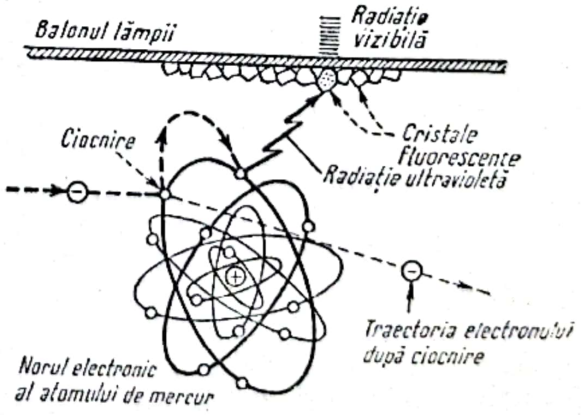


Fig. 2.32. Producerea luminii în lampa fluorescentă.

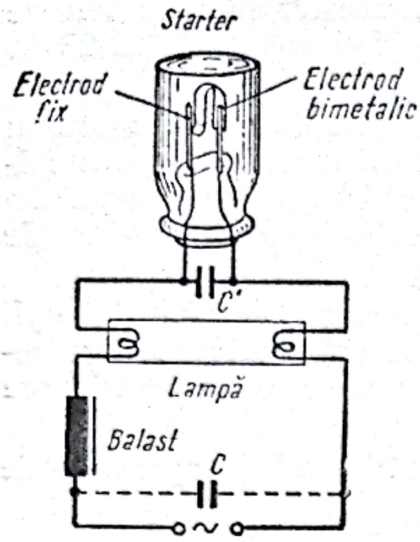


Fig. 2.33. Schemă generală de conectare a tubului fluorescent.

emit în principal radiaţiile ultraviolete cu $\lambda = 253{,}7$ nm. Condiţiile optime de funcţionare ale tubului fluorescent se obţin pentru un curent de 0,25 ... 1 A, diametrul tubului fiind de circa 40 mm, iar lungimea între 0,4 şi 1,5 m.

Amorsarea şi funcţionarea tubului fluorescent este condiţionată de:

— preîncălzirea electrozilor, pentru ca aceştia să aibă o emisie termoelectronică puternică;

— realizarea unei tensiuni de amorsare, avînd o valoare de circa cinci ori mai mare decît tensiunea de funcţionare normală;

— stabilizarea descărcării în arc.

Realizarea acestor condiţii este asigurată de dispozitivele de preconectare: startere şi balasturi.

Starterul (dispozitivul de aprindere) se construieşte în diferite variante; cel mai răspîndit tip este starterul cu lampă luminescentă (fig. 2.33), cu neon şi electrozi reci. Unul dintre electrozi este executat dintr-o lamă bimetalică, constituită din două metale cu coeficienţi de dilatare foarte diferiţi. La conectarea lămpii la reţea, între electrozii starterului ia naştere o descărcare luminescentă care încălzeşte bimetalul; acesta se dilată şi atinge electrodul fix, moment în care descărcarea luminescentă încetează şi în circuitul balast — electrozii lămpii — starter se stabileşte un curent care încălzeşte pronunţat electrozii (1 000 °C), asigurînd o emisie puternică de electroni şi o evaporare parţială a mercurului. Întrucît descărcarea luminescentă a încetat, bimetalul starterului se răceşte şi întrerupe brusc circuitul. Energia electromagnetică a balastului inductiv produce impulsul de tensiune necesar amorsării descărcării în vaporii de mercur din tub. Căldura dezvoltată de descărcarea în arc este suficientă pentru a menţine în continuare incandescenţa electrozilor.

La bornele lămpii, legată în serie cu balastul, se stabileşte tensiunea de funcţionare (fig. 2.23, *b*) mai mică decît tensiunea de amorsare a starterului.

În cazul în care lampa nu s-a aprins, starterul acţionează din nou, toate fenomenele descrise mai sus repetîndu-se pînă la aprinderea lămpii.

Condensatorul C' montat în paralel cu starterul reprezintă un scurtcircuit pentru oscilaţiile de înaltă frecvenţă produse de lampă, oscilaţii care ar provoca perturbaţii radiofonice.

Balastul este elementul de limitare şi stabilizare a curentului prin lampă, a cărei rezistenţă interioară se micşorează o dată cu creşterea curentului. Principalele tipuri de balasturi fabricate în R.S.R. sînt următoarele:

— *balastul inductiv* (fig. 2.33), constituit dintr-o bobină cu circuit feromagnetic şi întrefier; realizează un defazaj inductiv al curentului faţă de tensiune,

căruia îi corespunde un factor de putere $\cos \varphi = 0{,}5$, valoare ce urmează a fi îmbunătăţită cu ajutorul condensatorului C;

— *balastul capacitiv*, compus dintr-un balast inductiv normal, legat în serie cu un condensator; provoacă un defazaj capacitiv al curentului faţă de tensiune, $\cos \varphi = 0{,}5$;

— *balastul pentru aprindere fără starter* (fig. 2.34), format din două bobine B_1, B_2 montate pe acelaşi circuit feromagnetic şi legate în serie cu condensatorul C; reprezintă un circuit rezonant serie, avînd ca rezultat mărirea tensiunii la bornele lămpii L şi preîncălzirea electrozilor. După amorsarea lămpii bobina B_1 limitează curentul prin lampă, iar condensatorul C contribuie la îmbunătăţirea factorului de putere ($\cos \varphi = 0{,}95$).

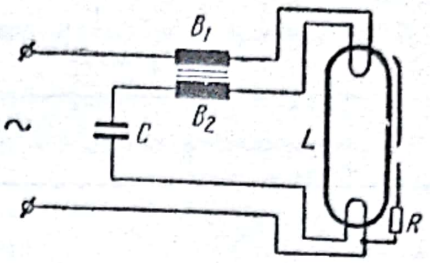


Fig. 2.34. Schemă de conectare a tubului fluorescent tip LFR, cu balast pentru aprindere fără starter.

Temperaturii optime a pereţilor tubului de 40 ... 50°C îi corespunde o temperatură a mediului ambiant de 20 ... 25°C. Scăderea temperaturii mediului sub 4 ... 5°C face ca mercurul să se vaporizeze în cantităţi insuficiente, radiaţiile ultraviolete ale descărcării se reduc, ceea ce duce la micşorarea fluxului luminos emis de luminofor. La temperaturi ridicate fluxul luminos al lămpii se micşorează datorită emisiei de radiaţii avînd lungime mare de undă.

Tuburile fluorescente produse la noi în ţară se execută în două variante: cu amorsare cu starter, pentru funcţionare în interior la temperaturi ce nu coboară sub 4 ... 5°C (simbol LFA) sau la temperaturi mai scăzute (simbol LFB) şi cu amorsare fără starter, pentru iluminatul exterior la temperaturi scăzute, pînă la —15°C (simbol LFR). Cînd temperatura mediului ambiant scade, lămpile se aprind mai greu; pentru a uşura amorsarea, lămpilor de tip LFB şi LFR li se aplică pe exteriorul tubului de sticlă o bandă metalizată legată la unul dintre electrozi, avînd rolul de a mări cîmpul electric din tub (fig. 2.34). Rezistorul R este montat în soclul tubului şi limitează curentul ce trece prin banda metalizată.

Caracteristicile colorimetrice ale tuburilor fluorescente sînt corespunzătoare, lumina acestor lămpi permiţînd o redare fidelă a culorilor într-o gamă largă de nuanţe. Prin alegerea şi combinarea corespunzătoare a substanţelor fluorescente se obţin diferite temperaturi de culoare, simbolizate ca în tabela 2.10. Tuburile cu „lumina zilei" produc o lumină foarte apropiată de lumina zilei (fig. 2.35) cînd cerul este acoperit de nori; la cele cu lumina „alb-cald" radiaţiile luminoase au o compoziţie spectrală apropiată de cea a lămpilor cu incandescenţă.

Fluxul luminos al diferitelor tuburi fluorescente este indicat în tabela 2.11; eficacitatea luminoasă are valori ridicate, între 50 şi 70 lm/W.

Durata de funcţionare a acestor lămpi este de 2 000 ... 3 000 ore, fiind influenţată de numărul de întreruperi (la un număr mic de întreruperi şi perioade lungi de funcţionare, durata este mai mare) şi de factorul de dis-

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.10

Culorile tuburilor fluorescente pentru iluminatul general

Denumirea culorii	Temperatura de culoare °K	Simbolul culorii
Alb lumina zilei	6500	1
Alb lumina zilei corectat	6500	1×
Alb	4300	2
Alb superior (de lux)	3800	2×
Alb cald	3000	3
Alb cald superior (de lux)	2900	3×

torsiune al curbei curentului prin lampă (fig. 2.36). Deformarea curbei tensiunii şi curentului prin lampă se datoreşte caracteristicii statice negative a descărcării electrice în arc (v. şi § 3.5.1).

Luminanţa are valori scăzute de (0,3 ... 1)10^4 nt, ceea ce favorizează utilizarea tuburilor fluorescente pentru iluminatul încăperilor joase.

Caracteristicile fotometrice şi electrice ale tuburilor fluorescente sînt relativ puţin influenţate de variaţiile de tensiune ale reţelei (fig. 2.37).

Fluxul luminos al tuburilor fluorescente alimentate în curent alternativ este variabil şi trece de 100 de ori pe secundă printr-o valoare apropiată de zero, datorită trecerii prin zero a curentului lămpii. Această pîlpîire a fluxului luminos dă naştere efectului stroboscopic, un efect de deplasare aparent sacadată a obiectelor iluminate, aflate în mişcare faţă de observator. Reducerea efectului stroboscopic se poate obţine prin:

— montarea tuburilor pe faze diferite ale reţelei trifazate;

— montarea în acelaşi corp de iluminat a două tuburi legate în paralel, unul avînd balast inductiv, iar celălalt —balast capacitiv, obţinîndu-se în acest mod un defazaj între fluxurile luminoase ale fiecărui tub şi un factor de putere apropiat de unitate;

— alimentarea tuburilor cu tensiune de frecvenţă mărită.

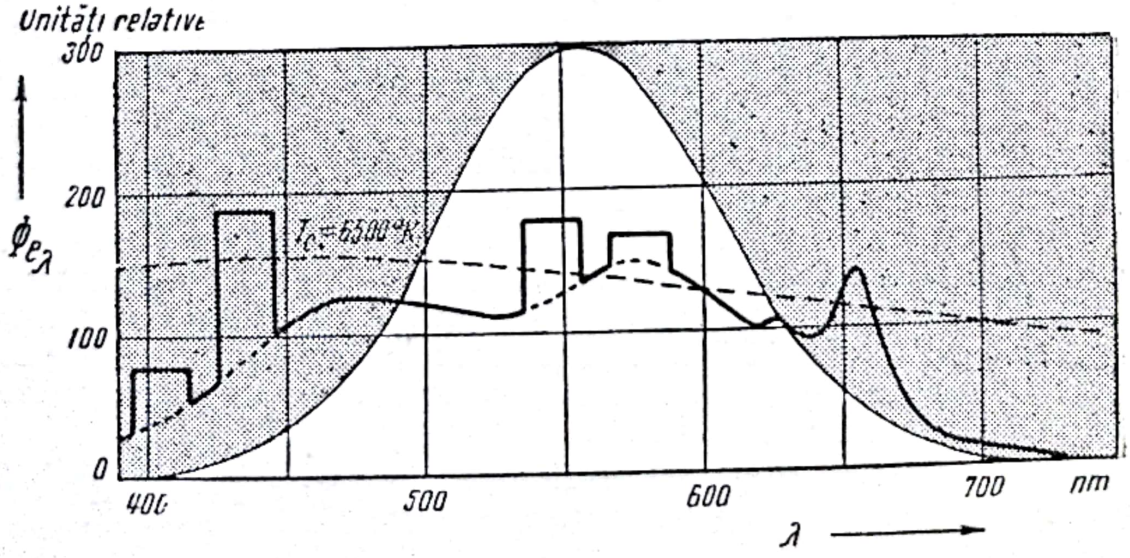


Fig. 2.35. Repartiţia spectrală a radiaţiilor lămpii fluorescente „alb lumina zilei corectat" (linie continuă) şi a corpului negru la 6 500 °K (linie întreruptă).

Tabela 2.11

Caracteristicile de funcţionare ale tuburilor fluorescente pentru iluminatul general, fabricate în R.S.R.

Cod	Puterea nominală W	Curentul nominal A	*Fluxul luminos nominal lm*						Observaţii
			1	1×	2	2×	3	3×	
LFA 14	14	0,39	—	430	580	360	590	390	Montaj cu starter
LFA 20	20	0,39	900	820	1080	700	1080	750	
LFA 40	40	0,43	2300	2120	2800	1750	2800	1880	
LFA 65	65	0,67	3600	3300	4400	2800	4400	3000	
LFB 40	40	0,44	2200	2000	2650	1680	2650	1780	Idem, aprindere la temperaturi scăzute
LFR 40	40	0,44	2200	200	2650	1680	2650	1780	Montaj fără starter, aprindere la temperaturi scăzute

Fig. 2.36. Variaţia tensiunii reţelei U, a tensiunii U_l, a tensiunii pe balast U_B şi a curentului prin lampă I_l pentru tubul fluorescent cu balast inductiv ($f = 50$ Hz).

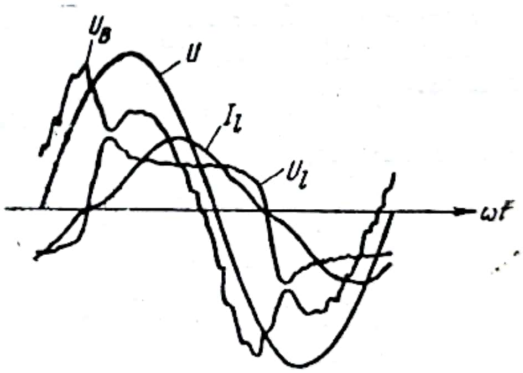
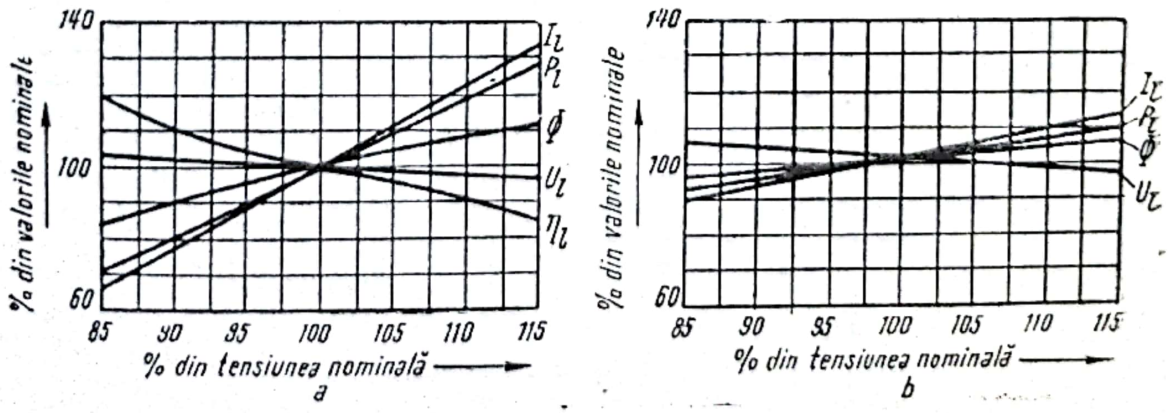


Fig. 2.37. Variaţia mărimilor caracteristice de funcţionare ale tuburilor fluorescente în funcţie de tensiune:

a — cu balast inductiv; *b* — cu balast capacitiv; I_l — curentul; P_l — puterea unui tub; Φ_l — fluxul luminos; U_l — tensiunea la bornele tubului; η_l — eficacitatea luminoasă.



Tuburi fluorescente speciale. Unele firme străine produc tuburi fluorescente cu caracter special recomandate pentru utilizare în anumite situaţii deosebite.

Tuburile fluorescente cu aprindere rapidă, se aprind la aplicarea tensiunii, nefiind necesară preîncălzirea electrozilor şi prezenţa starterului. La aceste tuburi se aplică o bandă metalizată în interiorul tubului de sticlă, legată la unul dintre electrozi, avînd rolul de a mări intensitatea cîmpului electric necesar amorsării. Aprinderea tubului durează circa 0,3 ... 1 secundă.

Balastul inductiv poate fi înlocuit cu o lampă cu incandescenţă. Această combinaţie utilizată în corpuri de iluminat speciale, pentru iluminatul în locuinţe şi birouri, îmbunătăţeşte spectrul de radiaţii luminoase al tubului fluorescent. Lămpile de acest tip se utilizează şi în corpurile de iluminat antiexplozive.

Tuburile fluorescente cu strat reflector conţin între stratul de luminofor şi peretele de sticlă al tubului un strat reflector dispus pe o zonă de 230° din secţiunea transversală a tubului (fig. 2.38, *a*). În acest mod, fluxul luminos este emis cu preponderenţă într-o direcţie dată, intensitatea luminoasă fiind aproape dublă în această direcţie.

O variantă a acestor lămpi o constituie tuburile fluorescente cu fantă (fig. 2.38, *b*), la care stratul reflector ocupă o zonă de 330° din secţiunea transversală a tubului, iar în zona fără strat reflector — fanta, nu există nici luminofor. Luminanţa fantei este mult mărită, ajungînd la $7 \cdot 10^4$ nt.

Aceste lămpi se recomandă pentru iluminatul vitrinelor, iluminatul cu scafe şi pentru corpurile de iluminat cu distribuţie directă a fluxului luminos.

Tuburi fluorescente de mare putere. Pentru obţinerea unor fluxuri luminoase mărite, necesare iluminatului căilor rutiere şi al halelor industriale, puterea tubului fluorescent trebuie crescută. Creşterea puterii tubului este

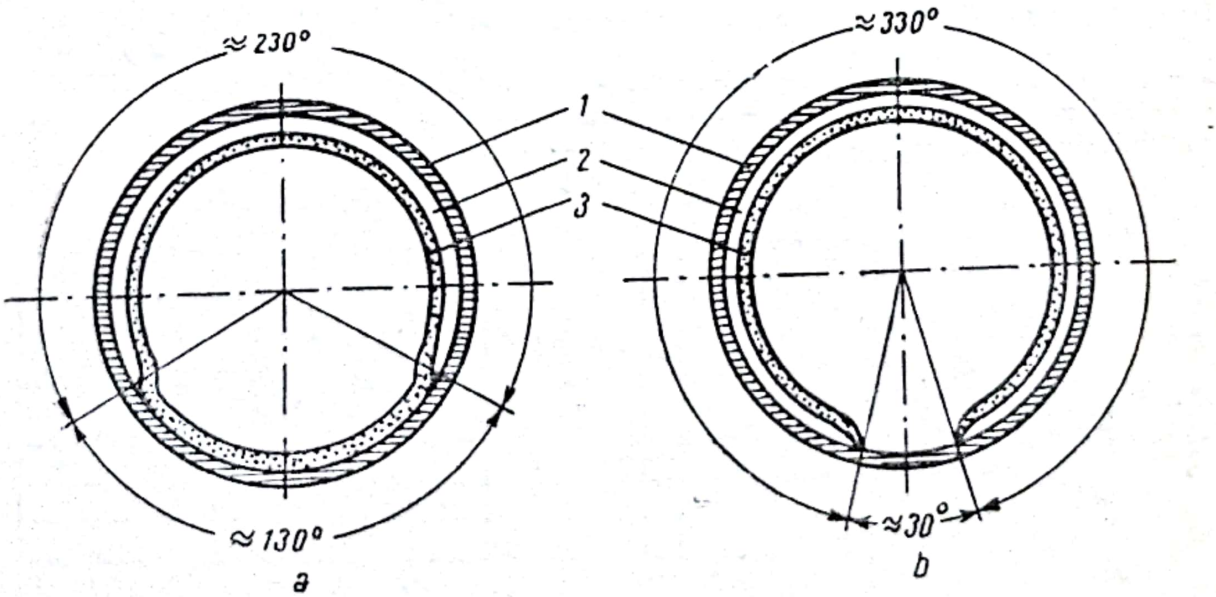


Fig. 2.38. Tub fluorescent cu strat reflector *a* şi cu fantă *b*:
1 — perete de sticlă; *2* — strat reflector; *3* — luminofor.

posibilă dacă se asigură condiţiile de răcire necesare obţinerii temperaturii (40 °C) şi presiunii optime (0,01 ... 1 mm Hg) a vaporilor de mercur, fără a mări peste măsură dimensiunile geometrice ale tuburilor.

Diferite firme au pus în fabricaţie tuburi fluorescente de mare putere (care depăşesc 80 W/m de tub), utilizînd diferite procedee pentru menţinerea presiunii la valoarea optimă, dintre care se menţionează:

— răcirea forţată cu aer a tubului de sticlă al lămpii cu ajutorul unui ventilator. Aceasta a permis construirea unor lămpi avînd puterea mărită pînă la 100 W/m de tub şi o eficacitate luminoasă de circa 60 ... 70 lm/W (tuburile fluorescente tip HO — „High—Output" şi SHO — „Super—High—Output" fabricate în S.U.A);

— crearea unui punct rece (35 ... 40°C) în cadrul sistemului termodinamic pe care-l reprezintă interiorul lămpii, care menţine presiunea de vapori la valoarea optimă, chiar dacă alte zone sînt mai calde. La tuburile fluorescente tip VHO — „Very—High—Output" (S.U.A), punctul rece este realizat la capetele tubului, prin ecranarea termică a soclului alungit al filamentului (fig. 2.39, *a*). În acest mod temperatura la capetele tubului s-a menţinut la 35 ... 40 °C, în timp ce temperatura tubului între electrozi, a crescut pînă la 120°. Puterea acestor lămpi a ajuns la 200 W/m de tub, eficacitatea luminoasă fiind de 60 ... 65 lm/W. Timpul de amorsare al acestor tuburi este de 5 minute, cu balast inductiv şi de 15 minute, cu balast capacitiv.

La tuburile fluorescente cu proeminenţă de răcire (numite şi dublu flux) tubul de descărcare este prevăzut cu o proeminenţă de circa 1 cm diametru şi 1 cm adîncime (fig. 2.39, *b*) realizată la mijocul distanţei dintre electrozi, avînd rolul de punct rece al tubului. Tubul funcţionează în condiţii optime cînd este montat cu proeminenţa în jos. Tuburile de tip Osram şi Philips au puterea de 100 W/m de tub şi eficacitatea luminoasă de 54 lm/W.

— modificarea raportului dintre secţiunea tubului şi suprafaţa lui exterioară, realizată prin deformarea tubului a cărui secţiune nu mai este circulară, tubul prezentînd adînciturі pe o parte sau alternativ pe ambele părţi (fig. 2.39, *c*). Avantajele acestui tub constau în mărirea intensităţii cîmpului electric din tub, reducerea absorbţiei radiaţiilor ultraviolete datorită micşorării distanţei medii între arc şi luminofor, mărirea lungimii coloanei pozitive şi crearea unor

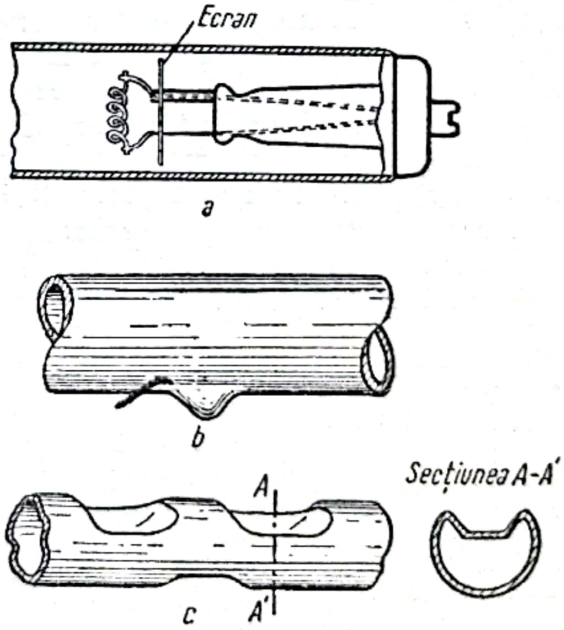


Fig. 2.39. Tuburi fluorescente de mare putere: *a* — cu punct rece la electrozi (tip VHO); *b* — cu proeminenţă de răcire; *c* — cu adînciturі laterale pe ambele părţi (tip PG).

puncte rece în apropierea adînciturilor. Tuburile tip PG — „Power-Groove" (S.U.A) au o putere de circa 100 W/m de tub şi eficacitatea luminoasă de 60 ... 70 lm/W.

Tuburi fluorescente de curent continuu. Tuburile fluorescente normale pot funcţiona şi în curent continuu dacă sînt prevăzute cu balasturi corespunzătoare; există însă şi tipuri constructive speciale de tuburi fluorescente de curent continuu, utilizate în iluminatul de siguranţă şi avarie, în iluminatul mijloacelor de transport în comun (trenuri, avioane, autobuze, tramvaie).

Avantajele alimentării tuburilor fluorescente cu curent continuu sînt: lipsa pîlpîirilor, un randament mare şi un factor de putere bun.

Schema de conectare a tuburilor fluorescente de curent continuu conţine un starter şi un balast inductiv în serie cu un rezistor; balastul inductiv creează supratensiunea necesară amorsării descărcării în momentul întreruperii de către starter a circuitului de încălzire a electrozilor, iar rezistorul stabilizează descărcarea. Ce element stabilizator se poate utiliza o lampă cu incandescenţă, mărind în acest mod fluxul luminos produs de întreaga instalaţie. Tuburile fluorescente de curent continuu sînt prevăzute şi cu un dispozitiv de inversare a polarităţii electrozilor, pentru a se evita concentrarea vaporilor de mercur la catod sub influenţa cîmpului electric (fenomenul de cataforeză), urmată de scăderea fluxului luminos emis de tub pînă la 50% din valoarea iniţială, după 24 de ore de funcţionare. De obicei este suficient să se schimbe polaritatea cu ajutorul unui întreruptor special, de fiecare dată cînd se aprinde lampa.

Tuburi fluorescente alimentate cu curent alternativ de frecvenţă mărită. Avantajele alimentării tuburilor fluorescente cu curent alternativ de frecvenţă mărită decurg din inerţia termică a coloanei arcului, a cărei temperatură şi densitate de ioni nu mai poate urmări variaţiile foarte rapide ale tensiunii, fenomenele de descărcare devenind practic cvasistaţionare. Descărcarea se reaprinde instantaneu după fiecare trecere prin zero a tensiunii, tensiunea şi curentul sînt puţin deformate, variaţiile fluxului luminos se atenuează şi nu mai sînt perceptibile. Folosirea frecvenţei mărite pentru alimentarea tuburilor fluorescente prezintă următoarele avantaje:

— eliminarea completă a pîlpîirii şi a efectului stroboscopic;

— eficacitatea luminoasă creşte cu 5 ... 20%, în funcţie de frecvenţă şi de tipul lămpii (fig. 2.40);

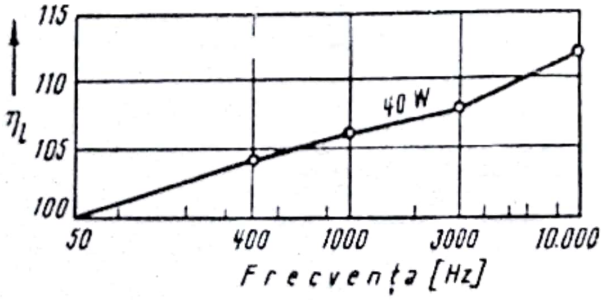


Fig. 2.40. Variaţia eficacităţii luminoase (în procente) cu frecvenţa, pentru tubul fluorescent de 40 W cu aprindere rapidă.

— tensiunea de amorsare este mai scăzută, deci tensiunea de alimentare mai apropiată de cea de funcţionare;

— dimensiunile balonului sînt reduse;

— factorul de putere este ridicat;

— durata de funcţionare se măreşte, datorită regimului de funcţionare mai avantajos.

Schema de conectare a tubului fluorescent alimentat cu frecvenţă mărită conţine un condensator legat în paralel cu tubul şi un balast inductiv înseriat. Condensatorul şi balastul reprezintă un circuit cu rezonanţă serie, avînd ca rezultat aplicarea unei tensiuni mărite tubului, în faza de amorsare. După amorsare, descărcarea din tub este stabilizată de balastul inductiv, condensatorul contribuind la îmbunătăţirea factorului de putere.

Frecvenţele optime din punct de vedere economic sînt de 400 ... 1 000 Hz şi se obţin cu ajutorul generatoarelor rotative de frecvenţă, a multiplicatoarelor de frecvenţă cu miezuri feromagnetice (§ 3.3.4) sau a convertizoarelor de frecvenţă cu tranzistoare [35].

Dezavantajele folosirii tuburilor fluorescente în înaltă frecvenţă (costul ridicat al surselor de frecvenţă mărită, construcţia specială a condensatoarelor, interferenţa cu frecvenţele de telecomunicaţii) fac ca această soluţie să aibă încă o utilizare limitată la iluminatul trenurilor, avioanelor şi al autobuzelor.

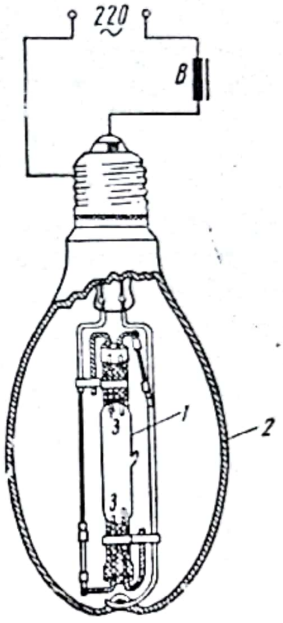


Fig. 2.41. Lampă fluorescentă cu vapori de mercur de înaltă presiune.

b. Lămpi fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune. Pentru corectarea compoziţiei spectrale a radiaţiilor lămpilor cu vapori de mercur de înaltă presiune, tubul de descărcare *1* se introduce într-un balon *2* avînd un strat de luminofor depus pe suprafaţa sa interioară (fig. 2.41); luminoforul emite în domeniul roşu al spectrului şi din combinaţia cu spectrul verde albăstrui al mercurului rezultă culoarea albă a luminii emise.

Amorsarea lămpii se face în 5 ... 10 minute cu ajutorul electrozilor auxiliari *3*, iar pentru stabilizarea descărcării se folosesc balasturi inductive *B*.

Caracteristicile lămpilor de acest tip fabricate în R.S.R. sînt date în tabela 2.12. Eficacitatea luminoasă variază între 32 şi 50 lm/W.

Tabela 2.12

Caracteristicile de funcţionare ale lămpilor fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune (tip LVF) fabricate în R.S.R.

Tipul lămpii	Puterea nominală W	Fluxul luminos lm	Curentul A	Factorul de putere cos φ
LVF 80	80	3000	0,80	0,50
LVF 125	125	5400	1,15	0,50
LVF 250	250	11500	2,05	0,55
LVF 400	400	20000	3,15	0,60

Scanned with OKEN Scanner

Lămpile fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune se întrebuinţează la iluminatul halelor industriale, străzilor, terenurilor de sport, unde se cer fluxuri luminoase mari, relativ concentrate şi nu se impun condiţii pretenţioase de redare a culorilor.

2.2.6. Plăci electroluminescente

Plăcile electroluminescente emit radiaţii luminoase pe baza luminescenţei unor anumite substanţe (de exemplu sulfură de zinc activată cu cupru) introduse într-un cîmp electric alternativ de valoare ridicată. Electronii luminoforului sînt excitaţi de acest cîmp electric, iar prin reîntoarcerea lor spontană pe nivelele energetice de bază determină emisia radiaţiilor vizibile. Luminoforul este introdus între doi electrozi (fig. 2.42) formînd o placă („condensator luminos") de grosime 0,8 ... 3 mm. Tensiunea de alimentare este de ordinul sutelor de volţi la frecvenţa de 50 ... 500 Hz, iar eficacitatea luminoasă obţinută pînă în prezent este de 10 lm/W. Culoarea luminii depinde de natura luminoforului, de valoarea tensiunii şi frecvenţei de alimentare.

Aplicînd mai multe plăci electroluminescente pe tavan sau pereţi se formează panouri al căror flux luminos variază între 40 şi 700 lm/m² (în cazul frecvenţei mărite de alimentare).

2.2.7. Comparaţia izvoarelor electrice de lumină

Diversitatea mare a lămpilor electrice şi a caracteristicilor lor luminotehnice face ca alegerea unei lămpi într-un anumit scop să constituie o problemă dificilă. Pentru a permite comparaţia diferitelor izvoare de lumină, în figura 2.43 sînt reprezentate principalele caracteristici ale acestora.

2.2.8. Reglarea fluxului luminos

În sălile de spectacole, expoziţii, pentru iluminatul decorativ şi iluminatul tunelelor rutiere este necesară reglarea continuă a fluxului luminos al lămpilor, între valoarea zero şi valoarea maximă.

La lămpile cu incandescenţă, reglarea fluxului luminos este simplă şi se realizează prin variaţia tensiunii aplicate lămpii cu ajutorul reostatelor, amplificatoarelor magnetice sau autotransformatoarelor reglabile. La aceste lămpi este suficientă o scădere de 30% a tensiunii de alimentare pentru a se reduce fluxul luminos la 1% din valoarea nominală.

Reglarea fluxului luminos la tuburile fluorescente nu este posibilă prin

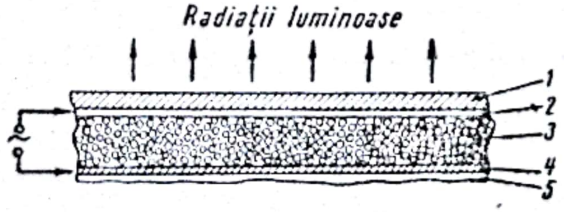


Fig. 2.42. Placă electroluminescentă:
1 — placă de sticlă; *2* — peliculă metalică transparentă (electrod); *3* — strat electroluminescent (grosime 20—50 μm); *4* — strat reflector; *5* — placă metalică de bază (electrod).

Scanned with OKEN Scanner

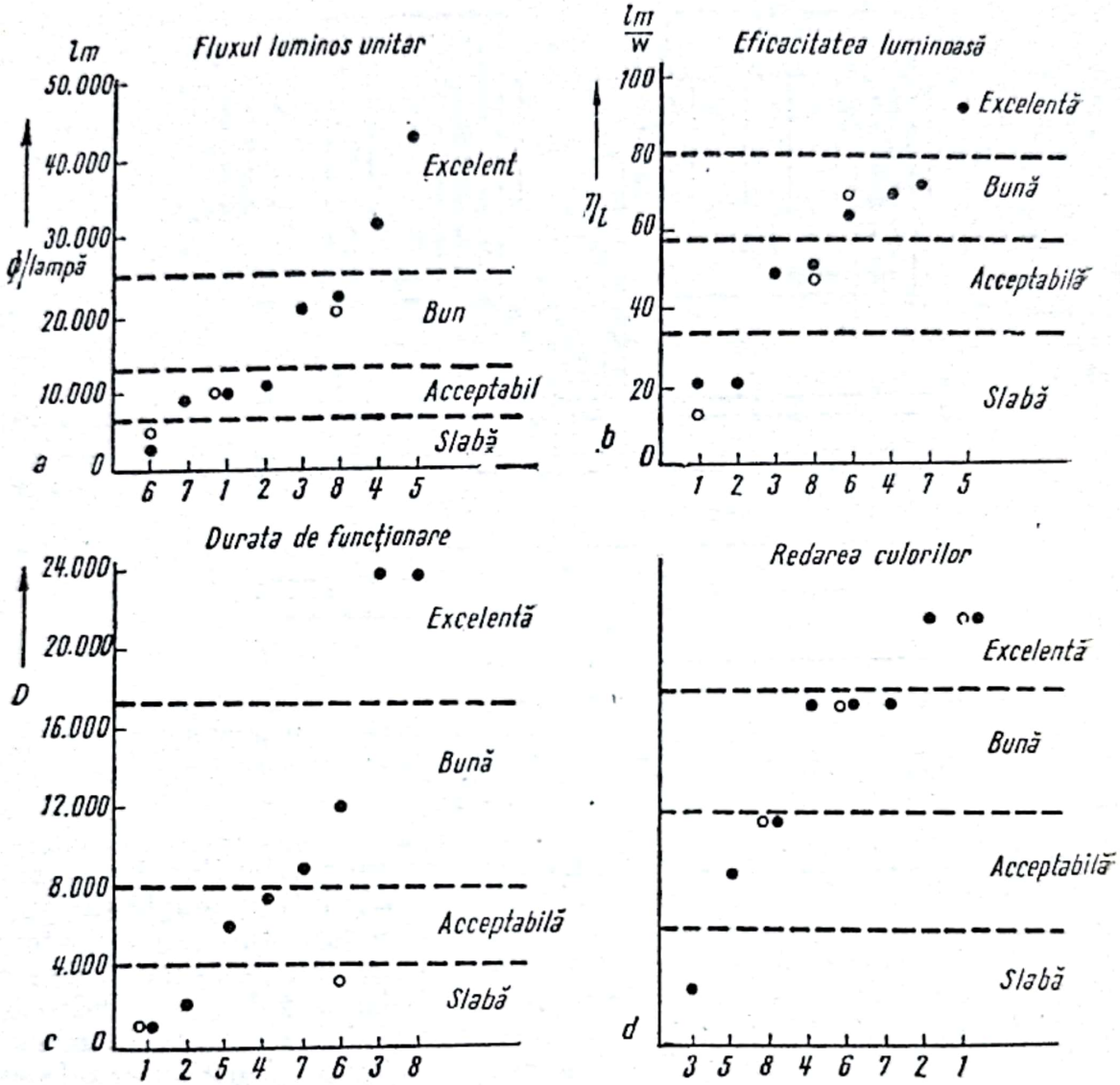


Fig. 2.43. Principalele caracteristici ale izvoarelor electrice de lumină:
a — fluxul luminos emis de o lampă (valori maxime); *b* — eficacitatea luminoasă; *c* — durata de funcționare; *d* — redarea culorilor ● — conform lucrării [48]; o — lămpi fabricate în R.S.R. *1* — lampă cu incandescență; *2* — lampă cu incandescență cu vapori de iod; *3* — lampă cu vapori de mercur de înaltă presiune (cu balon clar); *4* — lampă cu vapori de mercur de înaltă presiune cu adaos de ioduri metalice; *5* — lampă cu vapori de sodiu de înaltă presiune; *6* — tub fluorescent; *7* — tub fluorescent de mare putere; *8* — lampă fluorescentă cu vapori de mercur de înaltă presiune.

micșorarea tensiunii, datorită caracteristicii negative tensiune-curent și a tensiunii ridicate necesare pentru reamorsare. De asemenea, trebuie avut în vedere și faptul că, o dată cu scăderea curentului tensiunea de reamorsare crește. Variația fluxului luminos se obține modificînd curentul prin tub, fără a schimba în mod substanțial tensiunile.

Modificarea curentului lămpii se obține printr-un reglaj al amplitudinii cu reostate, bobine saturabile, amplificatoare magnetice, sau printr-un reglaj al fazei, cu tiratroane sau tiristoare.

Scanned with OKEN Scanner

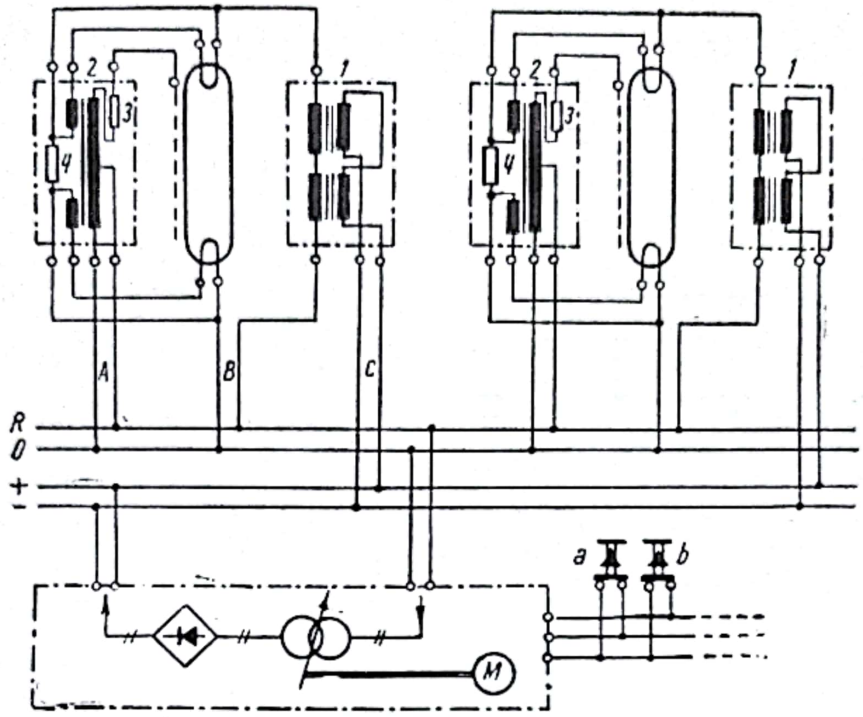


Fig. 2.44. Schema de conectare a tuburilor fluorescente avînd posibilitate de reglare a fluxului luminos cu amplificator magnetic: *1* — amplificator magnetic; *2* — transformator de încălzire a electrozilor; *3* — rezistor de protecţie; *4* — rezistor de egalizare; *A* — circuit de încălzire; *B* — circuitul lămpii; *C* — circuit de comandă; *a* — lumină; *b* — întuneric.

În figura 2.44 este indicată schema de conectare a tuburilor fluorescente avînd posibilitate de reglare a fluxului luminos cu ajutorul amplificatorului magnetic. Dispozitivul de reglare a curentului prin tub (amplificatorul magnetic în acest caz) este conectat în serie cu tubul. Înfăşurarea de sarcină a amplificatorului magnetic reprezintă balastul tubului, avînd o inductivitate variabilă în funcţie de valoarea curentului continuu de comandă.

Pentru încălzirea electrozilor lămpii (cînd lampa funcţionează la un curent scăzut) este necesar un transformator de încălzire, avînd cîte o înfăşurare pentru ficare electrod. Amorsarea lămpii este uşurată de banda metalică aplicată pe tub.

Dispozitivul de reglare a fazei curentului poate fi constituit din două tiratroane sau tiristoare în montaj de contactor. Dacă instalaţia de reglare a fluxului luminos este conectată la o celulă fotoelectrică, fluxul luminos poate fi modificat în mod automat în funcţie de intensitatea luminii naturale, obţinîndu-se astfel o iluminare constantă.

2.3. CORPURI DE ILUMINAT

Utilizarea directă a izvoarelor de lumină în instalaţiile de iluminat nu este posibilă în toate cazurile, deoarece acestea au în general o luminanţă prea mare, supărătoare pentru ochi, iar distribuţia fluxului lor luminos nu es-

te întotdeauna cea mai avantajoasă din punct de vedere al obținerii în mod economic a nivelului de iluminare prescris pe suprafețele iluminate.

Pentru a evita aceste inconveniente, izvoarele de lumină se includ în *corpuri de iluminat*. Corpurile de iluminat se clasifică în două categorii: obișnuite — cu rază mică de acțiune și proiectoare — cu rază mare de acțiune.

Corpurile de iluminat se compun dintr-un sistem optic și o armătură.

Sistemul optic are rolul de a modifica distribuția fluxului luminos al lămpii pentru obținerea repartiției spațiale dorite, de a reduce luminanța lămpii și de a modifica compoziția spectrală a fluxului luminos al lămpii. Sistemele optice se compun din elemente reflectante (reflectoare), transmițătoare-difuzante (difuzoare), transmițătoare-refractante (refractoare) sau filtre colorate, construite cu materialele indicate în § 2.1.2.

Armătura corpului de iluminat este reprezentată de ansamblul pieselor (în general metalice) care permit fixarea lămpii și a sistemului optic, alimentarea cu energie electrică și protejarea lămpii împotriva atmosferei ambiante (praf, umezeală, gaze etc.).

2.3.1. Caracteristicile fotometrice și clasificarea corpurilor de iluminat obișnuite

Principalele caracteristici fotometrice ale corpurilor de iluminat sînt: curbele fotometrice, randamentul și unghiul de protecție.

Curbele fotometrice (longitudinale) ale intensităților luminoase (fig. 2.45) sau curbele izocandele (fig. 2.46) se trasează de obicei în ipoteza că fluxul luminos total emis de lampa montată în corpul de iluminat este de 1 000 lm; valoarea reală a intensităților luminoase trebuie corectată în funcție de fluxul luminos Φ_l al lămpii (sau al lămpilor) montate în corpul de iluminat, factorul de corecție fiind $\Phi_l/1000$.

Randamentul η_c, reprezentînd raportul dintre fluxul luminos al corpului de iluminat și fluxul luminos al lămpilor montate în corp,

$$\eta_c = \frac{\Phi_c}{\Phi_l}, \qquad (2.47)$$

caracterizează corpul de iluminat din punct de vedere economic și depinde de materialul din care este executat corpul și de construcția acestuia.

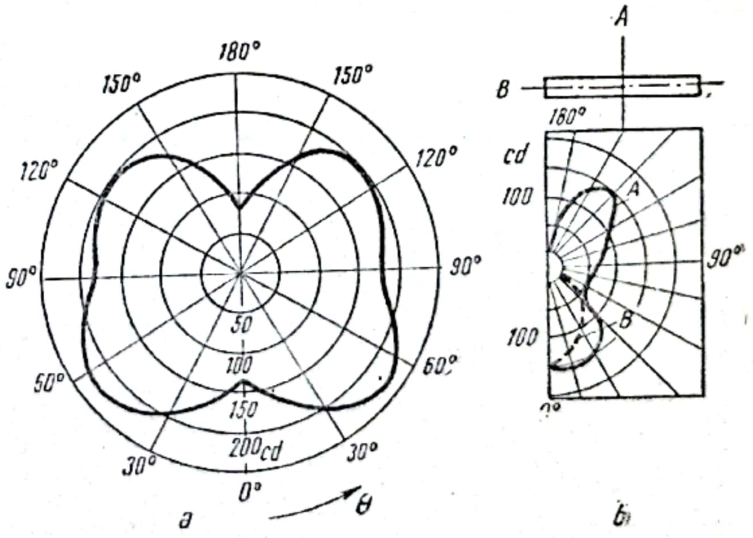


Fig. 2.45. Curbe fotometrice (longitudinale) pentru corpuri de iluminat:
a — simetrice; *b* — nesimetrice (pentru tuburi fluorescente).

Scanned with OKEN Scanner

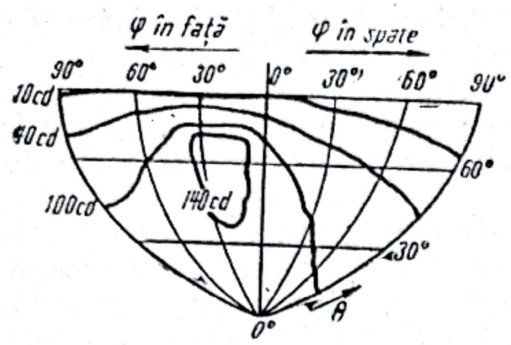


Fig. 2.46. Curbele izocandele ale corpului de iluminat tip PVC utilizat pentru lămpi fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune.

Unghiul de protecție (într-un anumit plan meridian) este unghiul dintre orizontală și linia limită sub care poate fi văzută lampa din corp. Unghiurile de protecție la corpurile de iluminat se realizează prin abajururi opace sau din sticlă lăptoasă. Corpurile de iluminat avînd unghiuri de protecție mai mici decît 30° nu prezintă o protecție suficientă a ochiului față de luminanța izvorului luminos. În funcție de valoarea acestui unghi, prescripțiile pentru iluminatul artificial normează înălțimea minimă de fixare a corpurilor de iluminat, plecînd de la necesitatea de a se limita efectul de orbire.

În funcție de repartiția fluxului luminos, corpurile de iluminat se împart în două categorii: corpuri de iluminat simetrice al căror corp fotometric este un corp de revoluție și corpuri de iluminat nesimetrice.

Corpurile de iluminat simetrice se pot împărți în trei clase: corpuri de iluminat direct, indirect și mixt, cu variantele semidirect, difuz, semiindirect, deosebindu-se după modul de repartizare a fluxului luminos Φ_c al corpului în cele două emisfere (Φ_s — fluxul luminos în emisfera superioară și Φ_i — în emisfera inferioară) obținute prin secționarea corpului fotometric printr-un plan orizontal ce trece prin centrul corpului de iluminat. Caracteristicile și indicațiile de utilizare ale corpurilor simetrice sînt cuprinse în tabela 2.13, iar curbele fotometrice corespunzătoare sînt trasate în figura 2.47.

Corpurile de iluminat simetrice se echipează cu lămpi cu incandescență sau lămpi fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune (pentru

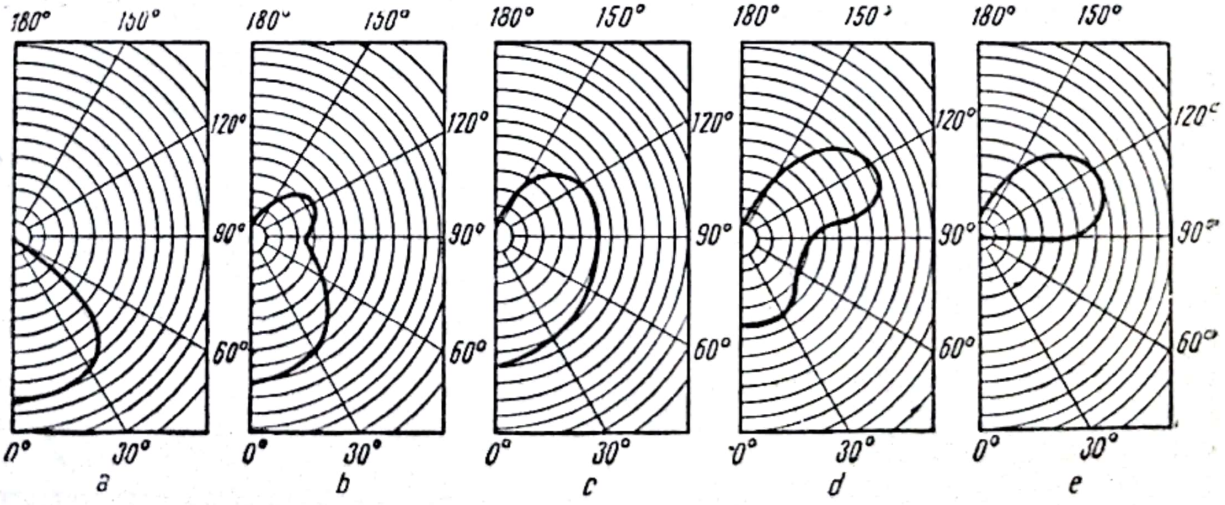


Fig. 2.47. Curbe fotometrice pentru corpuri simetrice de iluminat:
a — direct; *b* — semidirect; *c* — mixt (difuz); *d* — semiindirect; *e* — indirect.

Tabela 2.13

Caracteristicile corpurilor de iluminat simetrice

Corpul de iluminat	Distribuţia fluxului luminos	Materialul corpului de iluminat	Utilizare
direct (clasa D)	$\Phi_{\cup}/\Phi_c \geq 0{,}9$ repartiţie concentrată $\Phi_{0-40°} \geq 0{,}5\,\Phi_c$	materiale opace (tablă emailată, sticlă argintată)	Hale industriale înalte cu pereţi şi tavan întunecaţi ($\rho < 0{,}5$), iluminat local al suprafeţelor de lucru care necesită o iluminare orizontală intensă.
	repartiţie medie $\Phi_{0-50°} \geq 0{,}5\,\Phi_c$		Hale industriale înalte pînă la 8—10 m, cu tavan întunecat.
	repartiţie largă $\Phi_{0-50°} < 0{,}5\,\Phi_c$		Spaţii deschise, încăperi joase, iluminat local unde se cere o iluminare verticală din două părţi.
mixt (clasa M)	semidirectă $0{,}6 \leqslant \frac{\Phi_{\cup}}{\Phi_c} < 0{,}9$	sticlă lăptoasă, opalină sau mată, hîrtie specială, mase plastice, alte materiale translucide	Încăperi industriale şi auxiliare cu tavan şi pereţi în culori deschise ($\rho = 0{,}5 \ldots 0{,}7$), încăperi şcolare, birouri etc.
	difuză (mixtă) $0{,}4 \leqslant \frac{\Phi_{\cup}}{\Phi_c} \leqslant 0{,}6$ $0{,}4 \leqslant \frac{\Phi_{\cap}}{\Phi_c} \leqslant 0{,}6$		
	semiindirectă $0{,}6 \leqslant \frac{\Phi_{\cap}}{\Phi_c} < 0{,}9$		Încăperi cu tavan şi pereţi netezi, albi, unde principala cerinţă este absenţa umbrelor, contrastelor (cluburi, foaiere, săli de desen).
indirect (clasa I)	$\Phi_{\cap}/\Phi_c \geq 0{,}9$	materiale opace	Încăperi cu destinaţii generale (teatre, cinematografe, cluburi).

iluminatul exterior aceste lămpi pot fi montate în corpuri nesimetrice tip PSVC). Tuburile fluorescente se montează în corpuri de iluminat nesimetrice, format banană sau tronconic. Lucrările [33] şi [37] cuprind indicaţii referitoare la tipurile de corpuri de iluminat fabricate în ţara noastră.

Scanned with OKEN Scanner

2.3.2. Calculul fluxului luminos al corpurilor de iluminat

Cunoaşterea repartiţiei în spaţiu a fluxului luminos emis de corpurile de iluminat este necesară în numeroase probleme. Măsurarea directă a fluxului luminos cu ajutorul lumenmetrului sferic întîmpină dificultăţi constructive în cazul corpurilor de iluminat de dimensiuni apreciabile şi permite numai determinarea valorii totale a acestei mărimi.

Din aceste cauze este necesar să se calculeze fluxul luminos al corpurilor de iluminat pornind de la corpul fotometric, care reprezintă distribuţia spaţială a intensităţilor luminoase.

În general intensitatea luminoasă a unui corp de iluminat într-o direcţie oarecare în spaţiu este funcţie de valorile unghiului de azimut φ şi ale unghiului de înălţime θ care determină această direcţie (fig. 2.48)

$$I_{\theta\varphi} = f(\theta, \varphi).$$

Fluxul emis de un izvor luminos într-un unghi solid infinit mic $d\omega$ este

$$d\Phi = I_{\theta\varphi} \cdot d\omega, \tag{2.48}$$

iar fluxul total

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{\theta\varphi} \cdot d\omega. \tag{2.49}$$

Presupunem o sursă luminoasă punctiformă aşezată în centrul sferei de rază R egală cu unitatea. Calota sferică MN, avînd înălţimea h (măsurată pe axa sferei) şi cercul de bază paralel cu ecuatorul sferei, se vede din centrul O sub un unghi solid Ω egal cu suprafaţa calotei

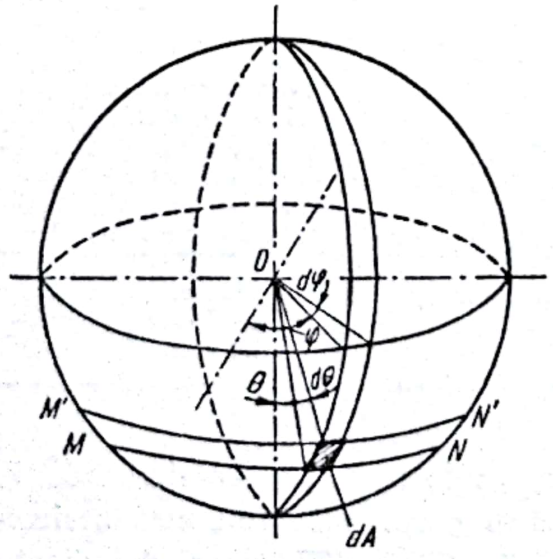


Fig. 2.48. Intensitatea luminoasă într-o direcţie în spaţiu.

$$\Omega = 2\pi Rh = 2\pi R(R - R\cos\theta),$$

astfel că pentru $R = 1$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta). \tag{2.50}$$

În această expresie, θ este unghiul de înălţime al unui punct oarecare de pe cercul de bază al calotei. Unghiul solid infinit mic al zonei sferice de lăţime infinit mică cuprinsă între cercurile paralele MN şi $M'N'$, de

unghiuri de înălțime θ, respectiv $\theta + d\theta$, se obține prin derivarea expresiei (2.50)

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta \, d\theta. \tag{2.51}$$

Intersectînd zona sferică de mai sus cu fîșia sferică delimitată de meridianele de unghiuri de azimut φ, respectiv $\varphi + d\varphi$, se obține o suprafață infinit mică dA, care se vede din centrul sferei sub un unghi solid

$$d\omega = dA = \frac{d\varphi}{2\pi} d\Omega = \sin\theta \; d\theta \; d\varphi.$$

În interiorul unghiului solid infinit mic $d\omega$, intensitatea luminoasă $I_{\theta\varphi}$ este constantă, astfel că expresiile (2.48) și (2.49) ale fluxului devin

$$d\Phi = I_{\theta\varphi} \sin\theta \, d\theta \; d\varphi; \tag{2.52}$$

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} I_{\theta\varphi} \sin\theta \; d\theta \; d\varphi. \tag{2.53}$$

Pentru corpuri de iluminat simetrice, intensitatea luminoasă este funcție numai de θ

$$I_\theta = f(\theta)$$

și intensitatea luminoasă este constantă în unghiul solid elementar $d\Omega$, astfel că expresiile fluxului devin

$$d\Phi = I_\theta d\Omega = 2\pi I_\theta \sin\theta \; d\theta; \tag{2.54}$$

$$\Phi = 2\pi \int_{\theta=0}^{\pi} I_\theta \sin\theta \; d\theta. \tag{2.55}$$

Calculul direct al fluxului luminos necesită exprimarea printr-o expresie analitică integrabilă a dependenței dintre intensitatea luminoasă și unghiurile θ, φ (pentru corpurile de iluminat nesimetrice), respectiv unghiul θ (pentru corpurile de iluminat simetrice). Deoarece, în cazul corpurilor de iluminat întîlnite în tehnica iluminatului electric, această dependență nu poate fi exprimată analitic, pentru calculul fluxului luminos se recurge la metode de integrare numerică [2] sau grafică.

Cele mai cunoscute metode grafice de calcul a fluxului luminos pentru corpuri de iluminat simetrice sînt metodele Rousseau și Matthews, prin care, pornind de la curba fotometrică a corpului de luminat, se ajunge la curba fluxului, curbă ce delimitează o suprafață egală cu fluxul luminos, la o anumită scară.

În metoda Rousseau (fig. 2.49) fluxul luminos este reprezentat în coordonate carteziene. Fie curba fotometrică a unui corp de iluminat sime-

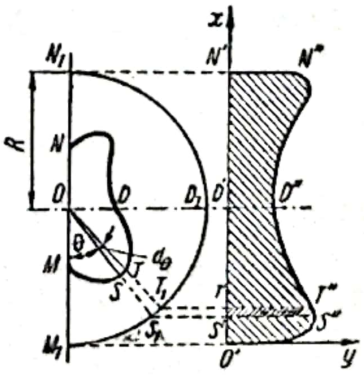


Fig. 2.49. Metoda grafică Rousseau.

tric, avînd MN ca ax de simetrie. Intensităţile luminoase sînt reprezentate în curba polară la scara 1 $cd = a$ cm, a fiind deci modulul scării intensităţilor luminoase. Se trasează un semicerc cu centrul în O, de rază oarecare R, în cm. Se duce o rază vectoare OS, care face unghiul θ cu axa de simetrie şi se prelungeşte pînă în punctul S_1 de intersecţie cu cercul. Se proiectează apoi punctul S_1 pe o axă $O'x$ paralelă cu MN şi din punctul S' astfel obţinut se ia un segment $S'S''$ egal cu lungimea razei vectoare OS, care reprezintă intensitatea luminoasă I_θ. Procedînd la fel pentru un număr cît mai mare de puncte de pe curba fotometrică se obţine curba $N'N''D''S''O'$ care se numeşte *curba Rousseau*. Se poate demonstra că aria suprafeţei cuprinse între curba Rousseau şi axa $O'x$ reprezintă, la o anumită scară, fluxul total emis de corpul de iluminat.

Într-adevăr curba fotometrică $I_\theta = f(\theta)$ se transpune într-un sistem rectangular de axe de coordonate $O'xy$

$$x = R - R\cos\theta\,;\quad y = aI_\theta. \tag{2.56}$$

Un element din suprafaţa închisă de curba Rousseau este deci

$$\mathrm{d}A = y\mathrm{d}x = R\,a\,I_\theta\,\sin\theta\,\mathrm{d}\theta. \tag{2.57}$$

Împărţind această expresie prin expresia care dă fluxul elementar emis între conurile de unghiuri la vîrf 2θ şi $2(\theta + \mathrm{d}\theta)$, rezultă

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A} = \frac{2\pi}{Ra},$$

deci suprafaţa închisă de curba Rousseau reprezintă fluxul luminos la scara

$$1\,[\mathrm{cm}^2] = \frac{2\pi}{Ra}\ \ [\mathrm{lm}]. \tag{2.58}$$

Metoda Rousseau se poate aplica şi în cazul corpurilor de iluminat nesimetrice. Pentru aceasta se împarte sfera de rază unitate în n fîşii sferice separate prin meridiane, unghiul $\Delta\varphi$ al fiecărei fîşii fiind suficient de mic pentru a putea considera curba fotometrică respectivă depinzînd numai de θ.

Fluxul total emis de corpul de iluminat este

$$\Phi = \sum_{k=1}^{n} \Delta\varphi_k \int_0^{\pi} I_{\theta k}\,\sin\theta\,\mathrm{d}\theta \tag{2.59}$$

cu condiţia ca $\sum_{k=1}^{n} \Delta\varphi_k = 2\pi$.

Cu aceste n curbe fotometrice se trasează curbele Rousseau. Notînd cu $A_1, A_2, \ldots A_n$ suprafeţele delimitate de aceste curbe, fluxul luminos total este

$$\Phi = \sum_{k=1}^{n} \frac{\Delta\varphi_k A_k}{Ra}\,; \tag{2.60}$$

Scanned with OKEN Scanner

în cazul în care fîşiile se aleg de suprafaţă egală, $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{n}$ şi relaţia (2.60) devine

$$\Phi = \frac{2\pi}{nRa} \sum_{k=1}^{n} A_k. \tag{2.61}$$

2.3.3. Proiectoare

Proiectoarele sînt corpuri de iluminat avînd un sistem optic (oglinzi sau lentile) care permite redistribuirea fluxului luminos produs de un izvor în aşa fel încît, într-un anumit unghi solid, se obţin intensităţi luminoase foarte mari.

În funcţie de utilizare, proiectoarele se clasifică în:

— proiectoare cu *acţiune apropiată* (cu lumină abundentă), utilizate pentru iluminarea suprafeţelor de mari dimensiuni aflate la o distanţă pînă la 50 m (faţadele clădirilor, terenuri industriale, staţii de triaj, terenuri de sport, şantiere etc.) fluxul luminos fiind emis într-un unghi solid mare;

— proiectoare cu *acţiune depărtată* (peste 50 m), utilizate pentru iluminarea terenurilor sportive mari, a aerodromurilor etc., avînd fluxul luminos concentrat într-un unghi solid mic.

În figura 2.50 este reprezentat sistemul optic al unui proiector. Reflectorul este format din doi paraboloizi: paraboloidul principal A şi paraboloidul secundar B avînd acelaşi focar ca primul, dar distanţa focală mai mare. Paraboloizii sînt legaţi printr-o zonă sferică C, cu centrul în focarul reflectorului. Destinaţia acestei suprafeţe sferice este să reflecte fluxul luminos pe paraboloidul A şi prin aceasta să mărească utilizarea fluxului izvorului.

În funcţie de destinaţia proiectorului, ca izvoare de lumină se utilizează lămpi cu incandescenţă normale sau speciale (de diferite puteri, ajungînd pînă la 10 kW) şi lămpi cu xenon.

Caracteristicile fundamentale ale proiectoarelor sînt:

— intensitatea luminoasă maximă;

— curbele instensităţilor luminoase sau curbele fotometrice;

— unghiul util de dispersiune;

— randamentul.

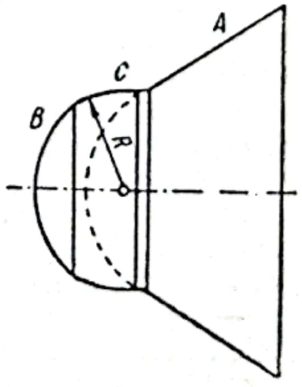


Fig. 2.50. Secţiune printr-un proiector cu acţiune apropiată.

Intensitatea luminoasă maximă I_{max} după axa optică a proiectorului determină distanţa la care reflectorul poate produce iluminarea cerută pe suprafaţa obiectului de iluminat.

Curbele intensităţilor luminoase se dau pentru un plan orizontal (care trece prin axa optică) şi unul vertical (care trece prin axa optică şi este perpendicular pe planul orizontal). Curbele fotometrice sînt

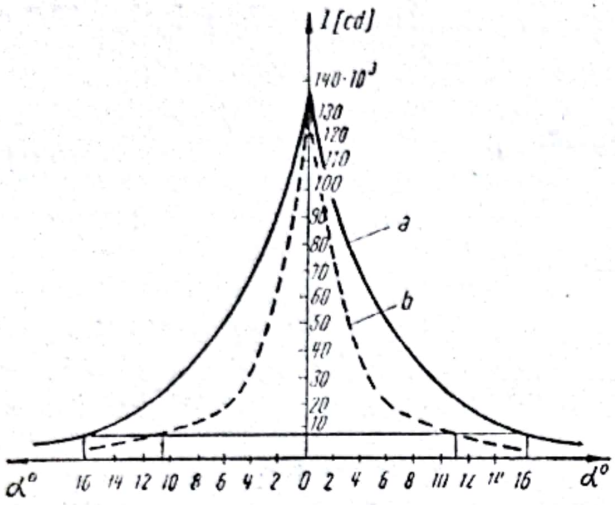


Fig. 2.51. Curbele fotometrice ale proiectorului:
a — în plan orizontal; *b* — în plan vertical.

reprezentate în coordonate polare sau rectangulare (fig. 2.51); axa ordonatelor se ia în direcţia axei optice a proiectorului iar pe axa absciselor se notează unghiurile dintre direcţiile intensităţilor luminoase şi axa optică.

Pentru a determina limitele conului luminos al proiectorului s-a introdus în mod convenţional noţiunea de *unghi util de dispersiune*. Unghiul util de dispersiune este unghiul, măsurat de la axa optică, în care intensitatea luminoasă a proiectorului se micşorează la 0,1 I_{max}.

Randamentul proiectorului este exprimat de raportul dintre fluxul luminos util (radiat în unghiul util de dispersiune) şi fluxul izvorului luminos.

2.4. CALCULUL FOTOMETRIC AL INSTALAŢIILOR DE ILUMINAT

2.4.1. Clasificarea instalaţiilor de iluminat

Instalaţiile de iluminat şi deci iluminatul se pot clasifica în funcţie de destinaţie, de natura izvoarelor de lumină, de caracteristicile corpurilor de iluminat şi de amplasarea lor.

În funcţie de destinaţie, iluminatul se clasifică în:
— iluminat interior;
— iluminat exterior.

În funcţie de natura principalelor izvoare de lumină folosite în practică, distingem:
— iluminat utilizînd lămpi cu incandescenţă;
— iluminat utilizînd lămpi fluorescente;
— iluminat cu lumină mixtă, utilizînd combinaţii de lămpi din ambele categorii.

În funcţie de caracteristicile corpurilor de iluminat, sistemul de iluminat poate fi direct, semidirect, mixt, semiindirect şi indirect. Prin combinarea acestor sisteme de iluminat se poate obţine:
— iluminatul dirijat, caracterizat prin faptul că lumina ajunge pe obiectele iluminate dintr-o direcţie principală, care favorizează producerea umbrelor şi realizarea contrastelor;
— iluminatul difuz, caracterizat prin faptul că lumina nu vine dintr-o direcţie principală asupra obiectelor iluminate, ceea ce favorizează reducerea luminanţelor.

Scanned with OKEN Scanner

În funcţie de amplasarea corpurilor de iluminat, instalaţiile de iluminat se clasifică în:

— iluminat general, care trebuie să realizeze iluminarea uniformă a unor spaţii şi la care nu se ţine seama de necesităţile particulare ale unor porţiuni din acele spaţii. Acest sistem de iluminat prezintă o difuziune bună şi micşorează diferenţele între luminanţele locurilor de lucru şi restului spaţiului;

— iluminat local, care trebuie să realizeze iluminarea unei suprafeţe relativ mici. În acest sistem de iluminat, corpurile de iluminat sînt amplasate în apropierea imediată a unuia sau mai multor locuri de lucru, realizîndu-se local un nivel de iluminare mai ridicat. Iluminatul local are avantajul realizării unei economii de energie electrică, deoarece suprafeţele reduse sînt iluminate cu izvoare de lumină de mică putere;

— iluminat combinat, care constă în iluminarea unei suprafeţe prin combinarea iluminatului local cu cel general. Acest sistem este recomandat cînd într-o anumită încăpere trebuie să se asigure un nivel de iluminare mai ridicat pentru anumite locuri de lucru, decît pentru altele. În acest caz, sistemul de iluminat general realizează nivelul minim de iluminare, iar cel local — iluminatul suplimentar în diferite locuri. Avantajele acestui sistem de iluminat constau în înlăturarea umbrelor şi realizarea unor iluminări, cu un consum de energie electrică mai redus decît în cazul iluminatului general. Costul iniţial al instalaţiei este însă mai mare în comparaţie cu iluminatul general.

În funcţie de destinaţia lor, instalaţiile de iluminat se pot clasifica în:

— instalaţii de iluminat normal, care au drept scop asigurarea condiţiilor favorabile de iluminat pentru muncă;

— instalaţii de iluminat de siguranţă, avînd drept scop înlăturarea panicei, a accidentelor şi asigurarea continuării lucrului atunci cînd instalaţia de iluminat normal se întrerupe;

— instalaţii de iluminat de pază, montate pe perimetrul terenurilor sau clădirilor ce trebuie supravegheate.

2.4.2. Condiţiile de calitate ale iluminatului

Luminanţa este mărimea recepţionată direct de ochiul omenesc şi care determină intensitatea senzaţiei luminoase. Calitatea unei instalaţii de iluminat electric este determinată de nivelul şi repartiţia luminanţei în cîmpul vizual. Datorită dificultăţilor de calcul a luminanţelor în diferitele puncte ale suprafeţelor de iluminat şi de normare a nivelurilor necesare de luminanţă, prescripţiile din diferite ţări cuprind recomandări pentru nivelurile iluminărilor ce trebuie realizate în instalaţii şi dau indicaţii mai mult calitative în ceea ce priveşte nivelurile şi repartiţia luminanţelor.

Condiţiile care caracterizează calitatea unei instalaţii de iluminat sînt următoarele:

— nivelul de iluminare;

— uniformitatea iluminării;

Scanned with OKEN Scanner

— direcţia luminii şi umbre;
— luminanţa şi contrastele de luminanţă;
— compoziţia spectrală a luminii.

Gradul de satisfacere al acestor condiţii depinde de importanţa instalaţiei şi de activitatea care se desfăşoară în spaţiul de iluminat. Limita superioară a acestui grad este fixată numai de criterii de ordin economic, deoarece instalaţiile de iluminat electric nu ating parametrii iluminatului natural, care reprezintă condiţiile cele mai favorabile pentru activitatea omenească.

Nivelul de iluminare. Iluminarea suprafeţelor sau a obiectelor trebuie să aibă o valoare suficient de mare, pentru a corespunde activităţilor ce se desfăşoară în spaţiul deservit de instalaţie. Valorile minime admisibile ale iluminării medii pentru construcţiile civile şi industriale din ţara noastră sînt indicate în tabelele 2.14 şi 2.15 şi se referă la planul util sau de

Tabela 2.14

Valorile minime admisibile ale iluminării medii pentru construcţii civile (conform STAS 6646—66)

Denumirea şi destinaţia încăperilor	*Valoarea iluminării, lx*	
	Tuburi fluorescente	Lămpi cu incandescenţă
A. Clădiri de locuit		
Camere de dormit	—	30
Camere de zi	—	50
B. Clădiri administrative		
Birouri	200	75
Săli de desen, proiectare	300	150
Depozite	—	30
C. Clădiri comerciale		
Magazine	250	150
Restaurante	300	100
Depozite	100	30
D. Social culturale		
Instituţii medicale	300	150
Instituţii de învăţămînt	300	150
Biblioteci	250	100
Cantine	200	75
Muzee, expoziţii	300	150
Teatre, cinematografe	200	50
E. Clădiri pentru comunicaţii (gări, poştă, telefoane, etc.)	300	150
F. Încăperi auxiliare		
Scări, coridoare	50	20
Grupuri sanitare	—	30
Centrale termice	—	50
Bucătării	200	50
G. Clădiri pentru sport	250—500	100

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.15

Valorile minime ale iluminării medii pentru iluminatul general al construcțiilor industriale (conform STAS 6646—66)

Categoria de muncă Detaliu de observat	*Iluminarea medie, lx*					
	lămpi fluorescente	lămpi incandescente	lămpi fluorescente	lămpi incandescente	lămpi fluorescente	lămpi incandescente
I Minuscul (sub 0,1 mm)	500 300	300 150	750 500	300	750	300
II Foarte fin (0,1—0,3 mm)	200	100 75	400 200	150 100	750 400	300 150
III Fin (0,3—1 mm)	200	75 50	200	100 75	300 200	150 100
IV Mic (1 — 10 mm)	150	50	150	50	150	50
V Mediu (peste 10 mm)	150	50	150	50	150	50
VI Supraveghere generală	75	20	75	20	75	20
	MARE		MEDIU		MIC	
	CONTRASTUL între fond și detaliu					

Gradul de luminozitate al suprafeței detaliului sau al fondului pe care se distinge detaliul se consideră *întunecat* ($\rho < 0{,}3$) pentru limita superioară, și *luminos* ($\rho > 0{,}3$) pentru limita inferioară.

lucru (suprafața la nivelul căreia se execută lucrările) considerat în general la o înălțime de 0,85 ... 1 m față de podea. Valorile prescrise pentru iluminările medii sînt mai mari pentru instalațiile cu lămpi fluorescente decît pentru cele cu lămpi incandescente. Lucrările ce se desfășoară în încăperi sînt împărțite în categorii numerotate de la I la VI, în ordinea descrescătoare a gradului de precizie.

Valorile iluminărilor pentru iluminatul de siguranță reprezintă circa 10% din nivelul prescris pentru iluminatul normal incandescent și 150 lx pentru iluminatul fluorescent.

Nivelele de iluminare pentru iluminatul exterior au valori scăzute, deoarece finețea lucrărilor care se execută în exterior nu este niciodată prea mare. Din considerente economice, valorile minime necesare sînt de ordinul a 1....3 lx. Numai în cazuri excepționale se prevăd iluminări mai mari

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.16

Valorile minime admisibile ale factorilor de uniformitate a iluminărilor [47]

Categoria construcţiilor	*Factori de uniformitate*	
	E_{min}/E_{max}	E_{min}/E_{med}
Construcţii industriale categoriile I, II, III, IV	0,3	0,65
Construcţii industriale categoriile V, VI	0,2	0,4
Construcţii civile	—	0,5
Suprafeţe de circulaţie	—	0,25

şi aceasta numai pentru suprafeţe restrînse (de exemplu în cazul terenurilor sportive). Pentru multe situaţii de iluminat exterior se recomandă anumite nivele de iluminare, atît în plan orizontal cît şi în plan vertical [33], [47].

Uniformitatea iluminării. Instalaţiile de iluminat trebuie să asigure o iluminare cît mai uniformă pe planul util, evitîndu-se prin aceasta obosirea ochiului supus unor eforturi repetate de adaptare, de la un nivel de iluminare la altul.

Uniformitatea iluminării se exprimă prin doi factori de uniformitate: minim-maxim E_{min}/E_{max} şi minim-mediu E_{min}/E_{med}, ale căror valori minime admisibile sînt date în tabela 2.16.

La iluminatul direct, pentru a realiza o repartiţie cît mai uniformă a iluminărilor pe planul de lucru, corpurile de iluminat trebuie să fie montate la înălţime cît mai mare şi la distanţe cît mai mici unul de celălalt. La iluminatul indirect corpurile de iluminat trebuie să fie aşezate la înălţime cît mai mică, pentru a se asigura o repartiţie cît mai uniformă a iluminărilor pe tavan.

În cazul iluminării străzilor cu circulaţie mare de pietoni şi cu circulaţie mică de vehicule, este necesar ca iluminarea verticală să fie egală cu cea orizontală. Dacă artera de circulaţie este caracterizată printr-o circulaţie foarte mare de vehicule în raport cu circulaţia pietonilor, se admite ca raportul acestor două iluminări să fie 1/10.

Direcţia luminii şi umbre. Direcţia de incidenţă a luminii asupra obiectului observat este un element care asigură posibilitatea de observare a acestuia şi depinde în mare măsură de sistemul de iluminat.

Un obiect iluminat în lumină dirijată (lumină incidentă dintr-o singură direcţie) va prezenta umbre puternice, marginile lui vor fi puternic reliefate, ceea ce asigură perceperea uşoară a detaliilor; contrastele de luminanţă vor fi însă mari.

În opoziţie cu această situaţie se prezintă iluminarea obiectelor în lumină general difuză, obţinută printr-o aşezare regulată şi simetrică a surselor de lumină. Obiectul fiind iluminat din mai multe direcţii, va prezenta umbre slabe, contrastele de luminanţă vor fi foarte mici, creindu-se o ambianţă plăcută şi reconfortantă.

Luminanţa şi contrastele de luminanţă. Luminanţa fiind mărimea ce influenţează direct ochiul omenesc, ea reprezintă factorul de calitate cel mai important al unei instalaţii de iluminat.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă luminanța obiectelor aflate în cîmpul vizual (surse luminoase, obiecte privite etc) depășește anumite valori, pot avea loc fenomene de orbire (orbirea este o senzație vizuală neplăcută sau o reducere a aptitudinii de a distinge obiectele). Pentru înlăturarea orbirii, corpurile de iluminat trebuie să fie prevăzute cu dispozitive de protecție (elemente difuzante), care să limiteze luminanța acestora la valorile:

— 3 000 .... 5 000 nt, pentru corpurile de iluminat destinate iluminatului interior general;

— 1 000.... 2 000 nt, pentru cele destinate iluminatului interior local;

— 5 000 nt, pentru cele de iluminat public amplasate pe străzi secundare;

— 10 000....30 000 nt, în limitele unghiului de protecție de 15°, pentru corpurile de iluminat public amplasate pe străzi principale și pe artere de circulație.

Înălțimea de suspendare a corpurilor de iluminat depinde de unghiul de protecție și de caracteristicile fotometrice ale acestora.

Factorii de reflexie și culorile diferitelor părți ale suprafețelor din interiorul încăperilor determină repartiția valorilor luminanțelor pe aceste suprafețe.

Pentru evitarea sau micșorarea fenomenului de orbire provocat de contrastul luminanțelor obiectelor din cîmpul vizual, se recomandă respectarea următoarelor raporturi:

— între luminanța obiectului observat și a cîmpului vizual din imediata vecinătate . . . . . 3 : 1;

— între luminanța obiectului observat și a cîmpului vizual înconjurător . . . . . 10 : 1;

— între luminanța izvoarelor de lumină și a suprafețelor învecinate . . . . . 20 : 1;

— între luminanțele a două puncte oarecare din cîmpul vizual . . 40 : 1.

Compoziția spectrală a luminii. Efectul fiziologic și psihologic al iluminatului depinde de compoziția spectrală a luminii, care influențează de asemenea contrastul dintre detaliu și fond, precum și redarea culorilor.

Sursele luminoase trebuie să aibă în general o culoare corespunzătoare particularităților locurilor iluminate. Dacă într-o încăpere lipsită în permanență de lumină culoarea este mai puțin importantă, în schimb acolo unde activitatea începută în lumină naturală este continuată în lumină artificială este necesar să se instaleze lămpi avînd culori apropiate de cea a luminii zilei.

Pentru a se evita contrastele neplăcute de culoare, nu se vor utiliza surse de culori diferite în iluminarea unei suprafețe de lucru.

Confortul vizual este direct legat de culoare și de nivelul de iluminare. Culorile caracterizate printr-o temperatură de culoare mai mică (zona galben-roșu) se numesc culori *calde*, deoarece creează o ambianță caldă, odihnitoare; ele se utilizează în cazul unor nivele de iluminare mai scăzute. Culorile caracterizate prin temperaturi de culoare ridicate (spre alb-albastru), denumite *reci* din considerente psihologice, se întîlnesc la nivele de iluminare ridicate.

Scanned with OKEN Scanner

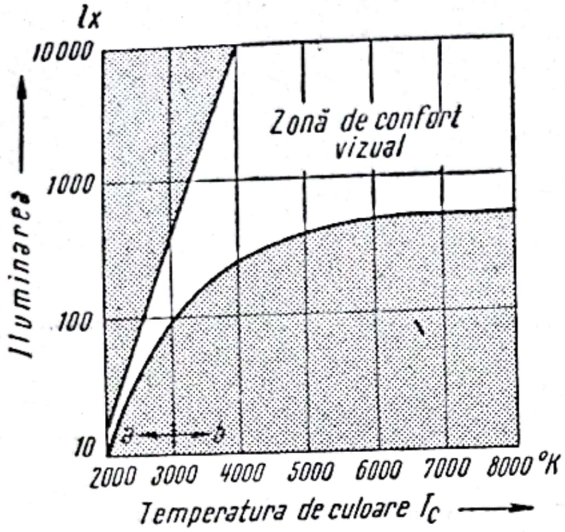


Fig. 2.52. Diagrama de confort vizual (după Kruithof):
a — lămpi cu incandescență; *b* — lămpi fluorescente.

Această corelație între culoare și nivelul de iluminare, impusă de realizarea confortului vizual, este exprimată în diagrama de confort vizual a lui Kruithof (fig. 2.52).

La iluminatul exterior, în special la iluminatul public, redarea culorilor este mai puțin importantă și în orice caz, subordonată criteriilor economice. Din motive de confort vizual, pentru iluminatul șoselelor se va alege o sursă cu lumină monocromatică (lampă cu vapori de sodiu) sau cu un spectru redus de linii (lampa cu vapori de mercur de înaltă presiune).

Calculul instalațiilor de iluminat poate fi considerat un calcul al iluminărilor și al repartiției acestora pe diferitele suprafețe iluminate. De luminanța izvorului de lumină, respectiv a suprafețelor iluminate trebuie să se țină seama atunci cînd aceasta influențează condițiile de iluminat.

Alegerea metodelor de calcul a instalațiilor de iluminat este determinată, în primul rînd, de caracteristicile corpurilor de iluminat. Dacă diametrul sau dimensiunea cea mai mare a corpului de iluminat este relativ mică (cel puțin cinci ori) față de distanța acestuia pînă la suprafața iluminată, corpul de iluminat se consideră sursă punctiformă. Dacă una din dimensiunile sale (lungimea) depășește cifra de mai sus, corpul de iluminat se consideră sursă liniară. Dacă diametrul sau dimensiunile sale (lungimea și lățimea) depășesc cifra de mai sus, corpul de iluminat se consideră ca un panou luminos.

2.4.3. Metoda coeficienților de utilizare pentru calculul valorilor medii ale iluminărilor

Această metodă se utilizează îndeosebi pentru calculul instalațiilor de iluminat interior și permite determinarea iluminării medii orizontale date de surse luminoase pe planul util, ținînd seama de fluxul luminos reflectat de pereți și tavan. Metoda nu poate fi folosită la calculul iluminatului local, iluminatului suprafețelor înclinate și verticale, iluminatului cu corpuri de iluminat de dimensiuni mari.

Coeficientul de utilizare u este raportul dintre fluxul luminos util Φ_u primit de planul util și fluxul emis de toate lămpile instalate într-o încăpere Φ_0:

$$u = \frac{\Phi_u}{\Phi_0}. \qquad (2.62)$$

Scanned with OKEN Scanner

Fluxul luminos al corpurilor de iluminat Φ_c se obține înmulțind fluxul luminos al lămpilor Φ_0 cu randamentul corpurilor de iluminat

$$\Phi_c = \eta_c \Phi_0. \tag{2.63}$$

Dacă se introduce mărimea denumită *utilanță*, care este raportul dintre fluxul luminos util și fluxul luminos al corpurilor de iluminat din aceeași încăpere

$$\eta_u = \frac{\Phi_u}{\Phi_c} \tag{2.64}$$

și care reprezintă un randament al încăperii, între cele trei mărimi: coeficient de utilizare, randament al corpurilor de iluminat și utilanță, se poate scrie relația

$$u = \frac{\Phi_u}{\Phi_0} = \frac{\Phi_u}{\Phi_c} \cdot \frac{\Phi_c}{\Phi_0} = \eta_u \eta_c. \tag{2.65}$$

Fluxul corpurilor de iluminat nu rămîne constant în timp, datorită faptului că fluxul lămpilor scade cu timpul, iar prin depunerea de praf pe corpurile de iluminat se micșorează randamentul acestora; are loc deci o depreciere a instalației de iluminat în timp, față de momentul punerii în funcțiune a instalației. Pentru a ține seama de această depreciere este necesar să se prevadă de la început un flux instalat mai mare al lămpilor, din care rezultă deci un flux util inițial Φ'_u mai mare introducînd un factor de depreciere k_d supraunitar. Ținînd seama de relația (2.65) se poate scrie:

$$\Phi'_u = \Phi_u \cdot k_d = u \Phi'_0 = \eta_u \eta_c \Phi'_0. \tag{2.66}$$

Fluxul util este egal cu produsul dintre iluminarea medie E_{med} și aria planului util, deci fluxul util inițial este

$$\Phi'_u = E_{med} A k_d = u \Phi'_0 = \eta_u \eta_c \Phi'_0. \tag{2.67}$$

Rezultă deci expresia fluxului total al lămpilor de instalat pentru a obține pe planul util o iluminare medie E_{med}

$$\Phi'_0 = \frac{E_{med} A k_d}{u} = \frac{E_{med} A k_d}{\eta_u \eta_c}. \tag{2.68}$$

Dacă s-a stabilit mai înainte numărul n de corpuri de iluminat, se poate deduce fluxul luminos Φ'_l al lămpilor dintr-un corp de iluminat

$$\Phi'_l = \frac{\Phi'_0}{n} = \frac{E_{med} A k_d}{n u} = \frac{E_{med} A k_d}{n \eta_u \eta_c}. \tag{2.69}$$

Valoarea coeficientului de utilizare depinde de o serie de parametri:

— Randamentul corpurilor de iluminat, cu care este direct proporțional, conform relației (2.65).

— Repartiţia intensităţilor luminoase în spaţiu a corpului de iluminat (corpul fotometric). Coeficientul de utilizare are o valoare cu atît mai mare cu cît repartiţia intensităţilor luminoase este mai concentrată (o mai mare parte din flux este trimis direct pe plan util).

— Forma şi dimensiunile încăperii. Cu cît înălţimea h de suspendare a corpurilor de iluminat deasupra planului util este mai mare, cu atît coeficientul de utilizare este mai scăzut. La aceeaşi înălţime de suspendare a corpurilor de iluminat, coeficientul de utilizare creşte cînd aria A a planului util se măreşte, deoarece creşte fluxul util. Cu cît forma încăperii diferă mai mult de un pătrat, cu atît coeficientul de utilizare este mai mic.

Influenţa formei şi dimensiunilor încăperii asupra coeficientului de utilizare se poate exprima printr-o mărime, numită *indicele localului*. Pentru indicele localului există diferite expresii, rezultatele cele mai corecte obţinîndu-se cu relaţia

$$i = \frac{ab}{h(a+b)}, \tag{2.70}$$

în care a şi b sînt laturile încăperii, iar h — înălţimea de suspendare a corpului de iluminat deasupra planului util în cazul iluminatului direct, semidirect şi mixt sau înălţimea tavanului deasupra planului util în cazul iluminatului indirect şi semiindirect.

— Factorii de reflexie ai pereţilor laterali şi tavanului. Fluxul reflectat de aceste suprafeţe participă la iluminarea planului util cu o parte dependentă de factorii de reflexie respectivi.

Coeficienţii de utilizare sînt tabelaţi în funcţie de aceşti parametri — tabelele 2.17 şi 2.18; tabelele complete pentru toate cazurile întîlnite în practică sînt date în lucrările [33] şi [37]. În calculele cu ajutorul tabelelor de coeficienţi de utilizare trebuie să se folosească acea formulă pentru indicele localului, care a stat la baza elaborării tabelelor respective.

Metoda coeficienţilor de utilizare se aplică în modul următor:

a) Se calculează indicele localului cu ajutorul formulei (2.70) pentru sistemul de iluminat adoptat.

b) Se stabilesc factorii de reflexie ai tavanului şi pereţilor (tab. 2.2).

c) Se citeşte din tabele valoarea coeficientului de utilizare căutat pentru corpul de iluminat prevăzut a se monta şi pentru valorile obţinute ale indicelui localului, factorului de reflexie al pereţilor, respectiv al tavanului. Pentru indici ai localului mai mari decît cinci se introduce în calcule coeficientul de utilizare corespunzătoare indicelui cinci.

Dacă corpul de iluminat considerat are un randament η_c' diferit de randamentul η_c al corpului din tabel, se face o corecţie a factorului de utilizare, după relaţia

$$u' = u\,\frac{\eta_c'}{\eta_c}, \tag{2.71}$$

u fiind coeficientul de utilizare citit în tabel, iar u' — coeficientul de utilizare căutat.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.17

Coeficienți de utilizare pentru iluminatul cu lămpi incandescente (valabili la punerea în funcțiune a instalațiilor) [37]

Factori de reflexie %	Tavan		70			50			90		
	Pereți		50	30	10	50	30	10	50	30	10
Tipul corpului de iluminat	η_c^* %	i	*Coeficienți de utilizare*								
Direct	0 ↑ 75 ↓ 75	0,5	0,27	0,22	0,18	0,27	0 22	0,18	0,26	0,22	0,18
		0,75	0,36	0,31	0,27	0,35	0,30	0,27	0,34	0,30	0,27
		1,0	0,43	0,38	0,34	0,42	0,37	0,34	0,41	0,37	0,34
		1,5	0,52	0,47	0,44	0,50	0,47	0,44	0,50	0,46	0,44
		2	0,57	0,53	0,50	0,56	0,53	0,50	0,56	0,53	0,50
		2,5	0,61	0,58	0,55	0,60	0,57	0,55	0,59	0,57	0,55
		3	0,63	0,61	0,58	0,63	0,60	0,58	0,62	0,60	0,58
		4	0,67	0,65	0,63	0,66	0,64	0,63	0,66	0,64	0,63
		5	0,69	0,68	0,66	0,69	0,67	0,66	0,68	0,67	0,66
Mixt	42 ↑ 80 ↓ 38	0,5	0,24	0,20	0,16	0,21	0,17	0,15	0,18	0,15	0,13
		0,75	0,34	0,29	0,35	0,29	0,25	0,22	0,24	0,22	0,19
		1,0	0,40	0,35	0,32	0,34	0,31	0,28	0,29	0,26	0,24
		1,5	0,47	0,44	0,41	0,42	0,38	0,36	0,35	0,33	0,31
		2	0,53	0,50	0,43	0,46	0,44	0,41	0,39	0,38	0,36
		2,5	0,56	0,54	0,52	0,49	0,47	0,45	0,42	0,40	0,39
		3	0,58	0,56	0,55	0,51	0,49	0,48	0,44	0,43	0,42
		4	0,61	0,58	0,58	0,54	0,53	0,52	0,46	0,46	0,45
		5	0,62	0,60	0,61	0,55	0,55	0,54	0,47	0,47	0,47
Indirect	80 ↑ 80 ↓ 0	0,5	0,19	0,15	0,12	0,13	0,10	0,088	0,078	0,063	0,052
		0,75	0,27	0,22	0,19	0,18	0,15	0,13	0,11	0,093	0,080
		1,0	0,31	0,27	0,24	0,22	0,19	0,17	0,13	0,11	0,10
		1,5	0,38	0,34	0,32	0,27	0,24	0,22	0,16	0,14	0,13
		2	0,42	0,39	0,36	0,29	0,27	0,26	0,17	0,16	0,15
		2,5	0,45	0,42	0,40	0,31	0,30	0,28	0,18	0,18	0,17
		3	0,46	0,44	0,42	0,32	0,31	0,30	0,19	0,18	0,18
		4	0,48	0,46	0,45	0,34	0,33	0,32	0,20	0,19	0,19
		5	0,50	0,48	0,47	0,35	0,34	0,33	0,21	0,20	0,20

* Semnificația cifrelor din coloana 2;
— cifra de sus-fracțiunea din fluxul luminos al corpului de iluminat emisă în emisfera superioară;
— cifra de jos-idem, emisă în emisfera inferioară;
— cifra de mijloc-randamentul η_c, al corpului de iluminat.

d) Se alege valoarea iluminării medii de realizat, în funcție de destinația încăperii sau categoria de lucrări ce se efectuează în această încăpere (tab. 2.14 și 2.15).

e) Se determină valoarea coeficientului de depreciere (supraunitar) (tab. 2.19).

f) Se determină numărul corpurilor de iluminat din încăpere (§ 2.4.5).

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.18

Coeficienţi de utilizare pentru iluminatul cu lămpi fluorescente (valabili la punerea în funcţiune a instalaţiilor) [37]

Factori de reflexie %		Tavan	70			50			30		
		Pereţi	50	30	10	50	30	10	50	30	10
Tipul corpului de iluminat	η_c %	i	*Coeficienţi de utilizare*								
Direct	0 ↑ 75 ↓ 75	0,5	0,26	0,21	0,17	0,26	0,21	0,17	0,25	0,20	0,17
		0,75	0,36	0,30	0,27	0,35	0,30	0,27	0,34	0,30	0,27
		1,0	0,42	0,37	0,33	0,42	0,37	0,33	0,41	0,37	0,33
		1,5	0,51	0,46	0,43	0,50	0,46	0,42	0,49	0,45	0,42
		2	0,56	0,52	0,49	0,55	0,52	0,49	0,55	0,52	0,49
		2,5	0,60	0,57	0,54	0,59	0,56	0,54	0,58	0,56	0,53
		3	0,62	0,59	0,57	0,61	0,59	0,56	0,61	0,58	0,56
		4	0,66	0,64	0,62	0,65	0,64	0,62	0,65	0,63	0,62
		5	0,68	0,67	0,65	0,68	0,66	0,65	0,67	0,65	0,65
Mixt	41 ↑ 80 ↓ 39	0,5	0,24	0,19	0,16	0,20	0,17	0,14	0,17	0,14	0,12
		0,75	0,33	0,28	0,24	0,28	0,24	0,21	0,24	0,21	0,18
		1,0	0,38	0,34	0,30	0,33	0,29	0,27	0,28	0,25	0,23
		1,5	0,46	0,42	0,39	0,39	0,37	0,34	0,34	0,31	0,29
		2	0,51	0,48	0,45	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34
		2,5	0,54	0,51	0,49	0,47	0,45	0,43	0,40	0,38	0,37
		3	0,56	0,54	0,51	0,49	0,47	0,45	0,41	0,40	0,39
		4	0,59	0,57	0,55	0,52	0,50	0,49	0,44	0,43	0,42
		5	0,61	0,59	0,58	0,53	0,52	0,51	0,46	0,45	0,45
Semiin-direct	50 ↑ 75 ↓ 25	0,5	0,22	0,18	0,15	0,18	0,15	0,12	0,14	0,12	0,10
		0,75	0,30	0,25	0,22	0,25	0,21	0,19	0,19	0,17	0,15
		1,0	0,33	0,31	0,28	0,29	0,26	0,23	0,23	0,21	0,19
		1,5	0,42	0,39	0,36	0,35	0,32	0,30	0,27	0,26	0,24
		2	0,46	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	0,30	0,29	0,27
		2,5	0,49	0,46	0,44	0,40	0,39	0,37	0,32	0,31	0,30
		3	0,51	0,48	0,46	0,42	0,40	0,39	0,33	0,32	0,31
		4	0,53	0,51	0,50	0,44	0,43	0,42	0,35	0,34	0,34
		5	0,55	0,53	0,52	0,45	0,45	0,44	0,37	0,36	0,35

g) Valorile mărimilor determinate anterior, introduse în formula (2.69) dau fluxul lămpilor dintr-un corp de iluminat. Se aleg apoi din cataloagele de lămpi numărul şi puterea lămpilor care dau un flux luminos mai mare şi cît mai apropiat de valoarea calculată. Se recalculează apoi valoarea medie obţinută pentru fluxul lămpilor alese.

Calculul direct al iluminărilor orizontale medii în instalaţiile de iluminat exterior este posibil prin metoda zonelor, aplicabilă corpurilor de iluminat simetrice [37]. Această metodă, în principiu similară cu metoda coeficienţilor de utilizare, se deosebeşte prin faptul că în locul fluxului luminos al corpului de iluminat se ia în considerare distribuţia zonală (în zone

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 2.19

Factorii de depreciere pentru calculul instalațiilor de iluminat din clădiri civile și industriale [47]

Caracteristicile încăperii	*Factorii de depreciere*		Periodicitatea de curățire a corpurilor de iluminat
	lămpi fluorescente	lămpi incandescente	
Încăperi în care se degajă mult praf, fum sau funingine (turnătorii, fabrici de ciment, filaturi etc.)	2	1,7	de patru ori pe an
Încăperi cu degajare mijlocie a prafului, fumului sau funinginei (încăperi obișnuite din industrie)	1,8	1,5	de două ori pe an
Încăperi cu puțin praf, fum sau funingine (birou, școli etc.).	1,5	1,3	o dată pe an

de cîte 10°) a fluxului luminos. Precizia rezultatelor este mult mărită prin analiza distribuției spațiale reale a fluxului luminos, complicațiile calculului necesitînd însă utilizarea calculatoarelor.

2.4.4. Metoda punct cu punct pentru calculul iluminărilor directe

Iluminarea E produsă de o instalație de iluminat într-un punct al unei suprafețe dintr-un spațiu interior este egală cu suma a două componente: componenta directă E_d și componenta reflectată E_r

$$E = E_d + E_r.$$

Componenta directă este iluminarea produsă de fluxul luminos direct, care reprezintă partea din fluxul luminos al corpurilor de iluminat care este primit direct pe suprafața iluminată, fără să sufere nici o reflexie pe pereții încăperii. *Componenta reflectată* este iluminarea produsă de fluxul luminos reflectat, reprezentînd partea din fluxul luminos al corpurilor de iluminat care este primit pe suprafața iluminată de la corpurile de iluminat, după o serie de reflexii multiple între pereții laterali, tavanul și podeaua încăperii.

În general, componenta directă a iluminării are valori diferite în diferite puncte de pe suprafața iluminată, spre deosebire de componenta reflectată care are o repartiție mai uniformă, datorită reflexiilor multiple care au loc între pereții încăperii. Printr-o așezare corespunzătoare a corpurilor de iluminat se poate asigura o repartiție aproape uniformă a componentelor directă și reflectată ale iluminărilor, astfel că se poate calcula valoarea medie a iluminării totale pe suprafața de iluminat.

În instalațiile exterioare componenta reflectată este inexistentă, astfel că iluminarea totală coincide ca valoare cu componenta directă a iluminării.

Scanned with OKEN Scanner

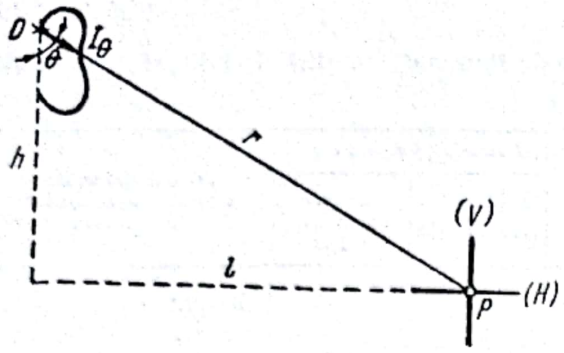


Fig. 2.53. Iluminarea într-un punct dat produsă de o sursă punctiformă

Metoda punct cu punct se utilizează pentru calculul componentelor directe ale iluminărilor, în instalaţii interioare şi pentru calculul iluminărilor totale în instalaţii exterioare. Pentru calculul componentelor reflectate ale iluminărilor în instalaţii interioare se utilizează metoda reflexiilor multiple [43].

Calculul componentei directe a iluminării prin metoda punct cu punct depinde de dimensiunile relative ale corpurilor de iluminat: punctiforme, liniare şi panouri luminoase. Această metodă presupune cunoaşterea curbelor fotometrice ale corpurilor de iluminat.

a. **Calculul iluminărilor directe date de surse luminoase punctiforme simetrice.** Prin transformarea relaţiei (2.14) care permite calculul iluminării produse într-un punct P al unei suprafeţe de către o sursă luminoasă O avînd intensitatea luminoasă I_θ în direcţia punctului situat la distanţa r de sursă, se pot determina iluminările în punctul P, în plan orizontal şi în plan vertical, în funcţie de înălţimea de suspendare h a izvorului luminos şi de distanţa orizontală l. Astfel, iluminarea în planul orizontal H (fig. 2.53) este

$$E_{Ph} = \frac{1}{k_d}\frac{I_\theta}{r^2}\cos\theta = \frac{1}{k_d}\frac{I_\theta}{h^2}\cos^3\theta = \frac{1}{k_d}\frac{I_\theta h}{(h^2+l^2)^{3/2}}, \qquad (2.72)$$

iar iluminarea în planul vertical V

$$E_{Pv} = \frac{1}{k_d}\frac{I_\theta}{r^2}\sin\theta = \frac{1}{k_d}\cdot\frac{I_\theta}{h^2}\cos^2\theta\sin\theta. \qquad (2.73)$$

În aceste relaţii k_d este factorul de depreciere, iar I_θ — intensitatea luminoasă rezultată din curba fotometrică a sursei. Corpul de iluminat fiind simetric, intensitatea luminoasă este aceeaşi în toate direcţiile care fac unghiul θ cu axa de simetrie. Pentru o anumită înălţime de montare a corpului de iluminat (h = const.), iluminarea iniţială orizontală $k_d \cdot E_{Ph}$ este funcţie numai de distanţa orizontală l. Iluminările pot fi reprezentate într-o diagramă în funcţie de distanţa l; curba obţinută are forma de clopot şi poate fi trasată numai pe jumătate din motive de simetrie. În figura 2.54,*a* sînt date trei astfel de curbe pentru un corp de iluminat simetric montat la diferite înălţimi h şi avînd curba fotometrică reprezentată în aceeaşi figură.

Dacă se intersectează corpul geometric al iluminărilor (pentru un anumit h) cu planuri paralele la diferite nivele de iluminare, se obţin curbe de egală iluminare — *curbe izolux*, care în acest caz sînt cercuri concentrice (fig. 2.54, *b*). Curbele izolux se construiesc prin puncte, deoarece iluminarea

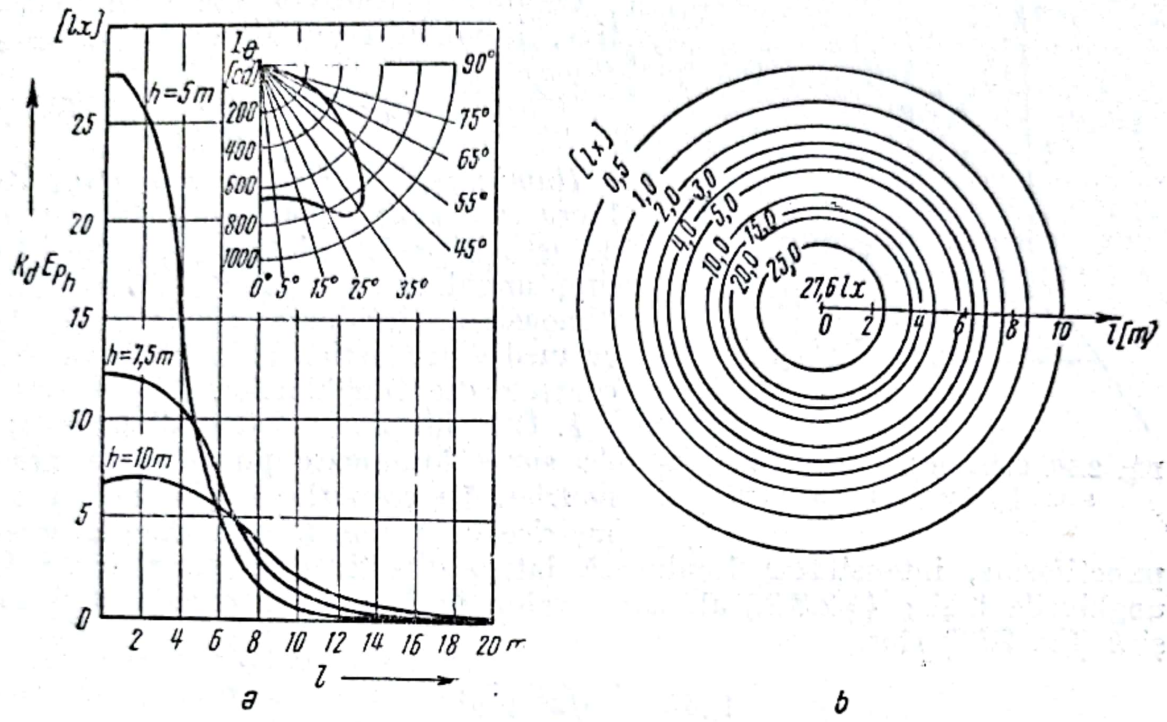


Fig. 2.54.

a — Diagrama iluminărilor în funcție de distanță. *b* — Curbe izolux pentru un corp de iluminat simetric.

orizontală nu poate fi exprimată, în general, printr-o relație suficient de simplă în funcție de distanța l.

Pentru simplificarea calculelor necesare trasării curbelor izolux se poate utiliza trasarea curbelor iluminărilor relative, care sînt independente de înălțimea de montare a corpurilor de iluminat. *Iluminarea relativă* este iluminarea inițială orizontală pentru o înălțime de suspendare $h = 1$ m. Înlocuind $h = 1$ în relația (2.72), se obține iluminarea relativă

$$\varepsilon = I_\theta \cos^3 \theta \qquad (2.74)$$

care depinde numai de raportul $\frac{l}{h}$ egal cu tgθ. Curba iluminărilor relative (fig. 2.55) se trasează pentru un corp de iluminat (avînd curba fotometrică din figura 2.54, *a*), în funcție de raportul $\frac{l}{h}$ pentru $l \leqslant h$ și în funcție de inversul acestui raport, $\frac{h}{l}$, pentru $l > h$.

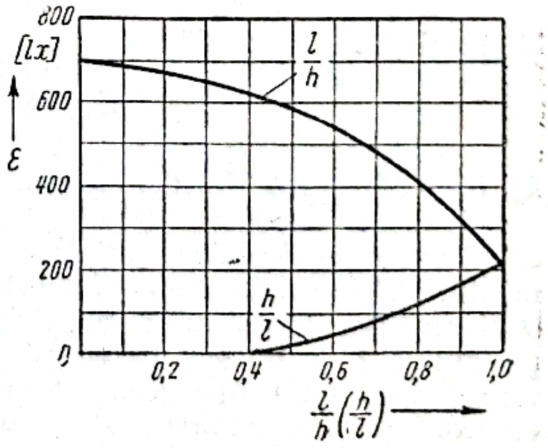


Fig. 2.55. Curba iluminărilor relative pentru corpul de iluminat avînd curba fotometrică din figura 2.54, *a*.

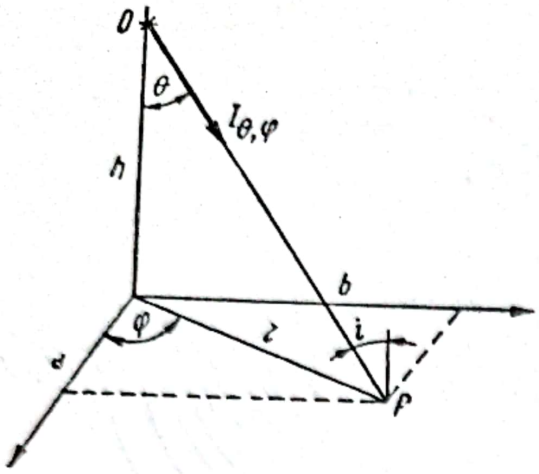


Fig. 2.56. Calculul iluminărilor date de surse luminoase nesimetrice.

Cunoscînd valoarea iluminării relative, iluminarea inițială orizontală este

$$k_d \cdot E_{Ph} = \frac{\varepsilon}{h^2}. \qquad (2.75)$$

Iluminarea medie pe suprafața de lucru se poate determina împărțind această suprafață într-o serie de mici dreptunghiuri sau pătrate de aceleași dimensiuni. Iluminarea medie este egală cu media aritmetică a iluminărilor din centrele dreptunghiurilor.

b. **Calculul iluminărilor directe date de surse luminoase punctiforme nesimetrice.** La corpurile de iluminat nesimetrice care pot fi considerate surse punctiforme, intensitatea luminoasă într-o direcție este determinată de unghiurile θ și φ (§ 2.3.2.) ale căror valori în funcție de coordonatele a,b și h (fig. 2.56) sînt

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta &= \frac{1}{h}\sqrt{a^2+b^2} \\ \operatorname{tg}\varphi &= \frac{b}{a}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.76)$$

Cu aceste valori ale unghiurilor θ și φ, din reprezentarea în spațiu a intensităților luminoase ale corpului de iluminat (de exemplu din curbele izocandele fig. 2.46) se obține intensitatea luminoasă $I_{\theta\varphi}$ și se poate calcula iluminarea directă orizontală în punctul P

$$E_{Ph} = \frac{1}{k_d} \cdot \frac{I_{\theta\varphi}\cos^3\theta}{h^2} \qquad (2.77)$$

și iluminarea verticală

$$E_{Pv} = \frac{1}{k_d} \cdot \frac{I_{\theta\varphi}\cos^2\theta\,\sin\theta}{h^2}, \qquad (2.78)$$

k_d fiind factorul de depreciere.

Calculul iluminărilor orizontale inițiale $k_d \cdot E_{Ph}$ se simplifică folosindu-se *curbele de egală iluminare relativă*. Pentru construirea acestor curbe se duce un plan Q' paralel cu planul de iluminat Q, la distanța $h = 1$ m de centrul O al corpului de iluminat (fig. 2.57). Intensitatea luminoasă $I_{\theta\varphi}$ în direcția punctului P întîlnește planul Q' în punctul P'. În planul Q punctul P este determinat prin coordonatele sale a și b, iar în planul Q' punctul P' este dat prin coordonatele relative

$$a_* = \frac{a}{h} \quad \text{și} \quad b_* = \frac{b}{h}.$$

Relațiile (2.76) devin în acest caz

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta = \frac{l}{h} = l_* = \frac{1}{h}\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{a_*^2+b_*^2}; \\ \operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{a} = \frac{b_*}{a_*}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.79)$$

Pe planul Q' se pot trasa curbele de egală iluminare relativă, termenul „relativ" arătînd că dimensiunile sînt raportate la înălțimea h, considerată mărime de bază și că iluminările sînt determinate pentru $h = 1$ m.

Din relația (2.77) rezultă că iluminarea inițială orizontală relativă este

$$\varepsilon = I_{\theta\varphi} \cos^3 \theta. \qquad (2.80)$$

Curbele de egală iluminare relativă pot fi reprezentate în coordonate rectangulare a_*, b_* sau în coordonate polare: $l_* = \operatorname{tg}\theta$ și φ. În figura 2.58 sînt trasate în coordonate polare curbele iluminării relative pentru un corp de iluminat nesimetric cu repartiție largă, echipat cu lampa convențională de 1 000 lm. Corpul de iluminat avînd două planuri de simetrie, s-a reprezentat numai un cadran din sistemul de axe de coordonate, deci pentru domeniul de variație $\varphi = 0 \ldots 90°$.

Calculul iluminării într-un anumit punct cu ajutorul acestor curbe se face astfel:

— după poziția punctului de iluminat P, se determină distanțele a și b și se calculează coordonatele relative

$$a_* = \frac{a}{h},$$

$$b_* = \frac{b}{h};$$

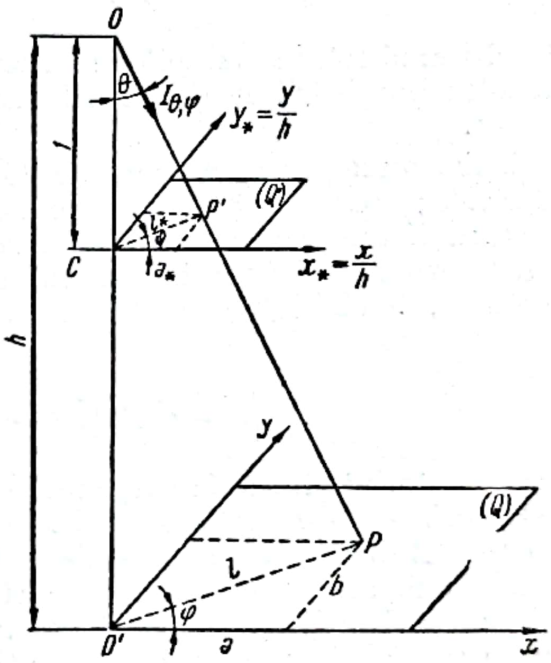


Fig. 2.57. Calculul iluminărilor cu ajutorul curbelor de egală iluminare relativă.

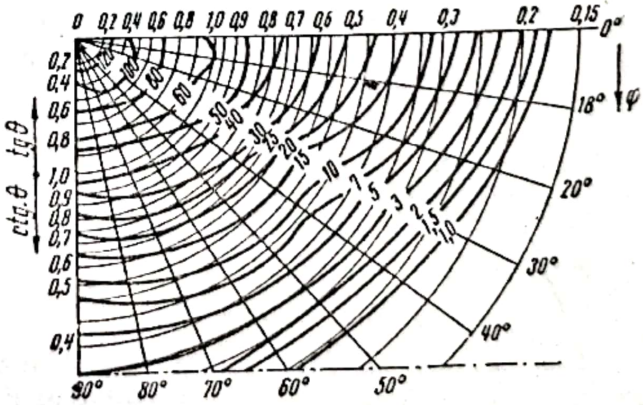


Fig. 2.58. Curbele valorilor relative ale iluminării orizontale inițiale pentru un corp de iluminat.

— se determină coordonatele polare relative ale punctului P'

$$l_* = \frac{l}{h} = \sqrt{a_*^2 + b_*^2}, \qquad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{b_*}{a_*};$$

— se determină din diagramă valoarea iluminării relative corespunzătoare coordonatelor l_* şi φ;

— curbele fiind construite pentru lampa convenţională de 1 000 lm, iluminarea orizontală iniţială căutată este

$$k_d E_{Ph} = \frac{\varepsilon}{h^2} \cdot \frac{\Phi_l}{1\,000}, \tag{2.81}$$

Φ_l fiind fluxul total al lămpilor montate într-un corp de iluminat.

Calculul iluminării medii se efectuează ca şi la corpurile de iluminat simetrice.

Curbele izolux pentru un corp de iluminat nesimetric nu mai sînt cercuri concentrice; aceste curbe se pot deduce din curbele izolux relative, schimbînd scara distanţelor orizontale pentru înălţimea de suspendare h a corpului. La corpurile pentru iluminatul străzilor, curbele izolux relative se construiesc, de obicei, pentru $h = 10$ m. Noua scară a distanţelor orizontale este

$$1\,[\text{cm}] = M \frac{h}{10}\,[\text{m}],$$

în care h este înălţimea de suspendare (în m), iar M — modulul scării distanţelor orizontale la curbele de iluminare relativă pentru $h = 10$ m.

c. **Calculul iluminărilor date de surse luminoase de dimensiuni mari.** Sursele luminoase de dimensiuni mari utilizate în instalaţiile de iluminat sînt tuburile, benzile şi panourile luminoase. Iluminarea produsă de aceste surse nu se mai poate calcula cu relaţiile stabilite pentru izvoare punctiforme, deoarece dimensiunile acestor surse nu mai sînt relativ mici faţă de distanţele la care se determină iluminarea. Iluminarea produsă de un element dA din suprafaţa unei astfel de surse, într-un punct P (fig. 2.59) este

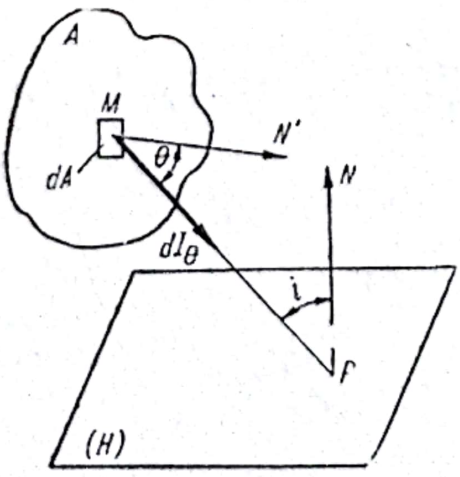


Fig. 2.59. Calculul iluminărilor date de surse luminoase de dimensiuni mari.

$$dE_P = \frac{1}{k_d} \cdot \frac{dI_\theta}{r^2} \cos i, \tag{2.82}$$

în care, conform relaţiei (2.17),

$$dI_\theta = L\, dA \cos\theta, \tag{2.83}$$

unde dI este intensitatea luminoasă dată de elementul dA în direcţia punctului P;

L — luminanţa elementului dA în direcţia punctului P;

θ — unghiul dintre normala la suprafața luminoasă și direcția MP a razei luminoase;
i — unghiul de incidență a razei luminoase în punctul P;
k_d — factorul de depreciere.

Înlocuind (2.83) în (2.82) se obține

$$dE_P = \frac{L dA \cos i \cos \theta}{k_d r^2}. \tag{2.84}$$

Iluminarea totală în punctul P produsă de întreaga suprafață A se calculează cu ajutorul integralei duble

$$E_P = \iint_A \frac{L}{k_d r^2} \cos i \cos\theta \, dA. \tag{2.85}$$

Sursele luminoase de dimensiuni mari utilizate în practică se consideră perfect difuzante (legea lui Lambert), adică prezintă o luminanță constantă în toate direcțiile, ceea ce conduce la o simplificare a calculelor iluminărilor produse de aceste surse.

Surse liniare. În cele ce urmează se prezintă formulele de calcul ale iluminărilor produse de o sursă liniară formată dintr-un șir de tuburi luminoase (fig. 2.60) în diferite puncte din planul util.

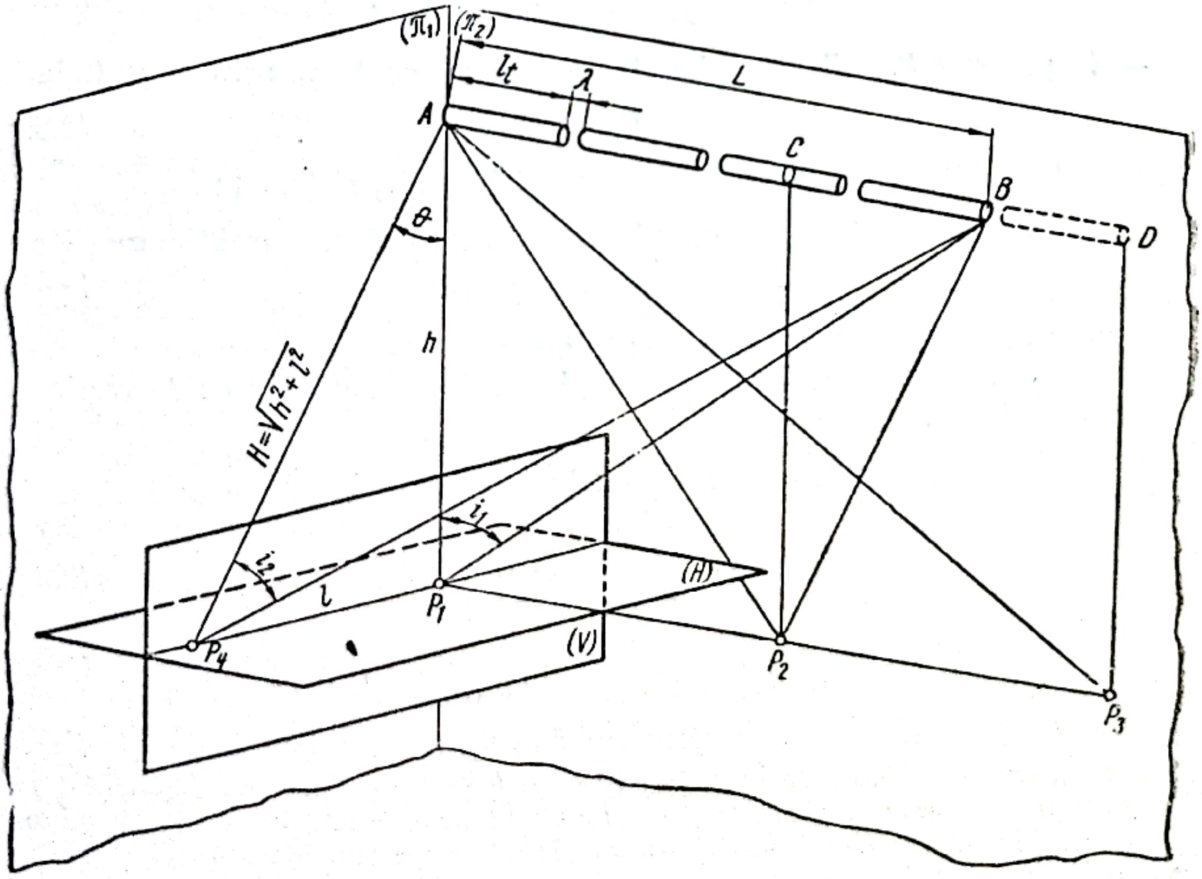


Fig. 2.60. Calculul iluminărilor date de o sursă luminoasă liniară.

Scanned with OKEN Scanner

Mărimea de calcul specifică este intensitatea luminoasă pe direcţia normală, a unităţii de lungime a sursei liniare [3]

$$I_U = \frac{\Phi_0}{\pi^2 L} \quad [\text{cd/m}], \tag{2.86}$$

în care Φ_0 reprezintă fluxul luminos total emis de corpurile de iluminat ce formează izvorul liniar de lungime L. Dacă şirul de corpuri de iluminat este discontinuu şi $\frac{l_i + \lambda}{h} \leqslant 0{,}7$, lungimea L reprezintă lungimea totală a şirului (corpuri şi spaţii libere); dacă $\frac{l_i + \lambda}{h} > 0{,}7$, se vor calcula iluminările produse de fiecare corp de iluminat în parte, iluminarea totală fiind suma iluminărilor parţiale.

Iluminarea orizontală şi verticală are următoarele expresii.

— în punctul P_1 (proiecţia capătului A al sursei liniare pe planul orizontal H)

$$E_{P_1 h} = \frac{I_U}{2h}(\sin i \cdot \cos i + i) = \frac{I_U}{2h}\left(\frac{hL}{h^2 + L^2} + \operatorname{arctg}\frac{L}{h}\right). \tag{2.87}$$

$$E_{P_1 v} = \frac{I_U}{2h}\sin^2 i = \frac{I_U}{2h}\frac{L^2}{h^2 + L^2}; \tag{2.88}$$

— în punctul P_2, aflat în planul vertical π_2 ce trece prin sursa liniară

$$E_{P_2} = E_{AC} + E_{CB}, \tag{2.89}$$

în care E_{AC} şi E_{CB} sînt calculate cu formulele (2.87) şi (2.88);

— în punctul P_3 situat în planul vertical π_2, în afara sursei liniare

$$E_{P3} = E_{AD} - E_{BA}, \tag{2.90}$$

BD fiind un element fictiv al sursei liniare;

— în punctul P_4, situat în afara planului π_2 la distanţa l de verticala extremităţii A a sursei liniare

$$E_{P_4 h} = E_{P_4 H}\cos\theta = \frac{I_U}{2H}(\sin i_2 \cos i_2 + i_2)\cos\theta =$$

$$= \frac{I_U}{2H}\left(\frac{HL}{H^2 + L^2} + \operatorname{arctg}\frac{L}{H}\right)\frac{h}{H}, \tag{2.91}$$

$$E_{P_4 v} = \frac{I_U}{2H}\sin^2 i_2 = \frac{I_U}{2H}\frac{L^2}{H^2 + L^2}, \tag{2.92}$$

în care $E_{P_4 H}$ este iluminarea în punctul P_4 pe planul perpendicular pe direcţia AP_4, calculată cu relaţia (2.87) în care h se înlocuieşte cu $H = \sqrt{h^2 + l^2}$.

Panouri luminoase. Iluminarea orizontală produsă de un panou luminos dreptunghiular $ABCD$ într-un punct P aflat pe normala într-unul din vîrfurile panoului este:

Scanned with OKEN Scanner

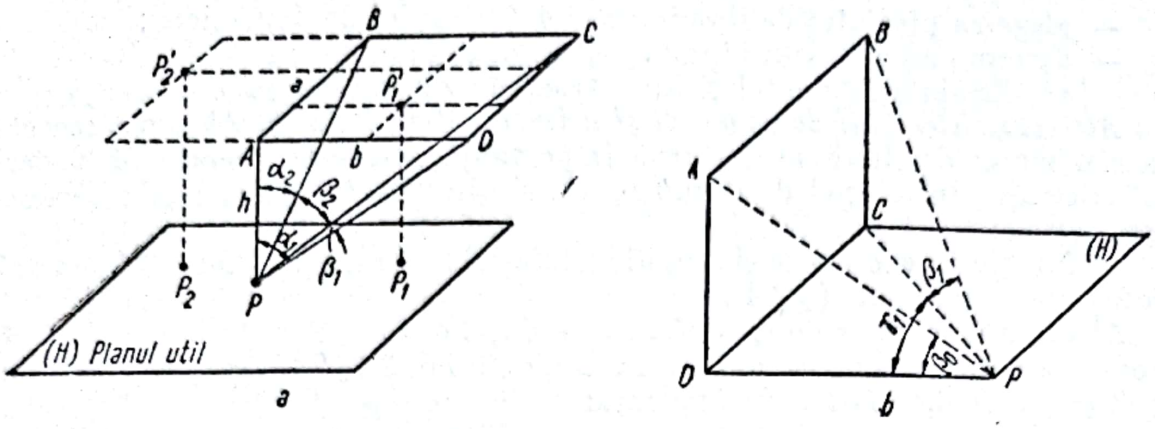


Fig. 2.61. Calculul iluminării dată de un panou luminos:
a — orizontal; *b* — vertical.

— pentru panou luminos orizontal (fig. 2.61, *a*)

$$E_{Ph} = \frac{L}{2}\ (\beta_1 \sin\alpha_1 + \beta_2 \sin\alpha_2)\,; \tag{2.93}$$

— pentru panou luminos vertical (fig. 2.61, *b*)

$$E_{Ph} = \frac{L}{2}\ (\beta_0 - \beta_1 \cos\gamma_1), \tag{2.94}$$

L reprezentînd luminanța panoului luminos.

În cazul în care punctul P în care se calculează iluminarea nu îndeplinește condiția de mai sus referitoare la poziția lui, prin împărțirea panoului luminos în dreptunghiuri de dimensiuni convenabile (dacă proiecția punctului cade în interiorul panoului luminos — punctul P_1 și figura 2.61, *a*) sau prin trasarea unor panouri dreptunghiulare fictive (în cazul contrar — punctul P_2), calculul iluminărilor se reduce la adunări sau scăderi de iluminări parțiale, calculate cu relațiile (2.93) și (2.94).

Practic, se utilizează nomograme calculate pentru diferite valori ale dimensiunilor panoului luminos și ale distanței de la panou la punctul în care se determină iluminarea [2], [33].

2.4.5. Proiectarea instalațiilor de iluminat interior

Datele de proiectare sînt: destinația și dimensiunile încăperii, caracterul activității ce se desfășoară, dimensiunile și dispoziția mașinilor de lucru sau a mobilierului, prezența eventualelor obstacole (poduri rulante, stîlpi etc).

Proiectarea cuprinde următoarele etape:

— alegerea sistemului de iluminat și a izvorului de lumină;

— alegerea corpurilor de iluminat și amplasarea lor;

— alegerea nivelului de iluminare şi a factorului de depreciere ;
— determinarea fluxului luminos şi a puterii lămpilor ;
— verificarea luminanţei şi a contrastelor de luminanţă.

Alegerea sistemului de iluminat şi a izvorului de lumină. Alegerea corectă a sistemului de iluminat prezintă importanţă atît din punctul de vedere al eficienţei instalaţiei de iluminat cît şi din punctul de vedere al economicităţii ei.

În funcţie de destinaţie şi scopul instalaţiei se va alege iluminatul general, local sau combinat (§ 2.4.1).

Alegerea izvoarelor de lumină se face după o serie de criterii corespunzătoare caracteristicilor diferitelor izvoare de lumină (§ 2.2), scopului instalaţiei şi particularităţilor de exploatare.

Lămpile cu incandescenţă se recomandă cînd este necesară utilizarea unor izvoare de lumină de dimensiuni mici avînd luminanţe mari, cînd sînt necesare iluminări mari (eventual cu lumină dirijată) pe suprafeţe mici, cînd se urmăreşte crearea unei ambianţe odihnitoare.

Lămpile fluorescente sînt recomandate cînd este necesară utilizarea unor izvoare de lumină de dimensiuni mari avînd luminanţe reduse, cînd sînt necesare iluminări mari (prin lumină difuză) pe suprafeţe mari, cînd este necesar să se obţină o redare corectă a culorilor.

Lămpile cu incandescenţă şi cele fluorescente fiind caracterizate prin diferite temperaturi de culoare, alegerea tipului potrivit de lampă se face în funcţie de nivelul de iluminare prescris, în conformitate cu diagrama de confort vizual (fig. 2.52).

Lămpile fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune se recomandă cînd sînt necesare izvoare de lumină de dimensiuni mici avînd eficacităţi luminoase mari, ca de exemplu în halele industriale de mare înălţime şi în special în locurile de degajări de praf şi fum.

Alegerea corpurilor de iluminat şi amplasarea lor. Alegerea corpurilor de iluminat se face în funcţie de mediul ambiant, de izvorul de lumină ales şi de caracteristicile lor principale (repartiţia fluxului luminos, randamentul, luminanţa şi unghiul de protecţie) — § 2.3.1, pentru a se obţine direcţia dorită a luminii, prezenţa sau lipsa umbrelor şi înlăturarea efectului de orbire.

Amplasarea corpurilor de iluminat este strîns legată de îndeplinirea condiţiilor de uniformitate a iluminării şi de luminanţă admisibilă. Factorul de uniformitate depinde de numărul corpurilor de iluminat şi de distanţa d dintre două corpuri de iluminat apropiate. Multe corpuri de iluminat aşezate la distanţe cît mai mici conduc la o uniformitate mare, însă măresc costul instalaţiei. Este necesară, deci, alegerea unei soluţii intermediare care să satisfacă parţial atît condiţia de uniformitate cît şi pe cea de economicitate.

Înălţimea de suspendare h a corpurilor de iluminat este stabilită în funcţie de considerente constructive sau practice. De exemplu, în halele industriale corpurile de iluminat se aşază pe fermele acoperişului, deasupra podurilor rulante care se deplasează în lungul halelor, astfel că înălţimea lor de sus-

Scanned with OKEN Scanner

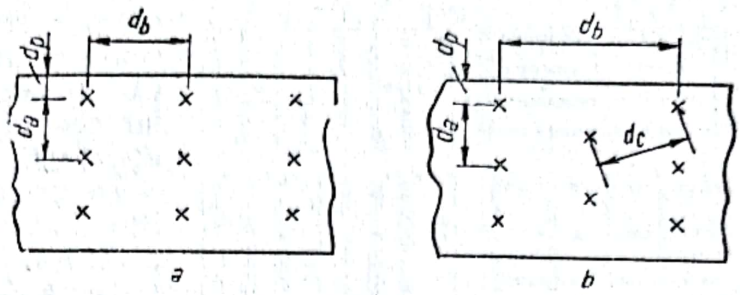


Fig. 2.62. Așezarea corpurilor de iluminat punctiforme într-o instalație de iluminat general:
a — în vîrfurile unui dreptunghi;
b — în vîrfurile unui triunghi.

pendare este impusă. În general, limita inferioară a înălțimii admise este determinată de limitarea efectului de orbire, iar limita superioară, de înălțimea tavanului.

Pentru realizarea condițiilor de calitate impuse instalației, corpurile de iluminat trebuie amplasate în mod corespunzător în funcție de tipul lor, de felul izvorului de lumină și de distanța relativă între corpurile de iluminat

$$d_* = \frac{d}{h}. \tag{2.95}$$

În cazul iluminatului mixt și indirect $d_* = \frac{d}{h_a}$, h_a fiind distanța de la corpul de iluminat la tavan.

La instalațiile de iluminat general, repartiția corpurilor de iluminat poate fi uniformă sau localizată.

Dispunerea uniformă se obține prin așezarea corpurilor de iluminat în vîrfurile unor dreptunghiuri sau triunghiuri, orientate în raport cu dimensiunile încăperii (fig. 2.62). Pentru au anumit factor de uniformitate, soluția optimă din punct de vedere economic se obține dacă $d_a = d_b$, în cazul așezării în dreptunghi și $d_a = d_c$ sau $d_b = \sqrt{3}\, d_a$, în cazul așezării în triunghi.

Distanța d_p de la ultimul rînd de corpuri pînă la perete se adoptă

$$d_p = (0{,}25 \ldots . 0{,}3)\ \ d, \tag{2.96}$$

cînd există utilaje, mese de lucru amplasate în apropierea pereților și

$$d_p = (0{,}4 \ldots . 0{,}5)\ \ d, \tag{2.97}$$

cînd lîngă pereți există spațiu de trecere.

Valorile distanței relative d_* depind de curba fotometrică a corpului de iluminat și sînt cuprinse în limitele 0,5....1,0 la iluminatul direct, 1,0 la iluminatul mixt și 1,2 .... 1,5 la iluminatul indirect.

Dispunerea localizată rezultă prin așezarea corpurilor de iluminat în apropierea principalelor locuri de activitate, permițînd realizarea iluminatului local.

La corpurile de iluminat cu tuburi fluorescente se obișnuiește repartizarea corpurilor în benzi continui sau discontinui (fig. 2.63); se recomandă

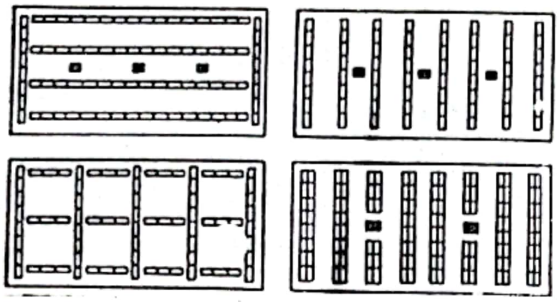


Fig. 2.63. Aşezarea corpurilor de iluminat cu tuburi fluorescente în benzi continui.

ca valoarea distanţei relative dintre centrele a două corpuri dispuse în cadrul aceleiaşi benzi să fie $d_* \leqslant 0{,}7$, iar cea dintre două benzi paralele, $d'_* \leqslant 0{,}6$.

În urma amplasării corpurilor de iluminat se obţine numărul total al acestora.

După alegerea nivelului de iluminare şi a factorului de depreciere (§ 2.4.2), cu ajutorul uneia dintre metodele de calcul a iluminărilor se determină fluxul luminos şi puterea lămpilor, verificîndu-se prin calcule luminanţa şi contrastele de luminanţă [37] sau [8].

Exemplu. Să se proiecteze instalaţia de iluminat interior a unei hale industriale, cu următoarele date de proiectare:

— dimensiunile halei: $L_1 \times L_2 \times H = 50 \times 25 \times 7$ m;
— categoria de muncă: II;
— gradul de luminozitate al suprafeţei detaliului: întunecat;
— degajare mijlocie de praf şi fum;
— factorii de reflexie ai pereţilor şi tavanului: $\rho_p = 0{,}5$ şi $\rho_t = 0{,}7$.

1. *Sistemul de iluminat şi izvorul luminos* utilizat: iluminat direct, general, cu tuburi fluorescente de 65 W.

2. *Corpurile de iluminat şi amplasarea lor:* corpuri industriale tip CIA, amplasate în şiruri luminoase discontinui; distanţa relativă dintre şiruri se ia $d'_* = 0{,}6$, iar distanţa relativă dintre centrele a două corpuri în cadrul aceluiaşi şir $d_* \simeq 0{,}6$, astfel că numărul total de corpuri de iluminat este 13 corpuri/şir $\times$ 7 şiruri = 91 corpuri.

3. *Nivelul de iluminare şi factorul de depreciere*
— $E_{med} = 200$ lx — tabela 2.15;
— $k_d = 1{,}8$ — tabela 2.19.

4. *Determinarea fluxului luminos*
— înălţimea de suspendare $h = 6$ m;
— indicele încăperii (rel. 2.70)

$$i = \frac{50 \cdot 25}{6(50 + 25)} \simeq 3;$$

— coeficientul de utilizare (tab. 2.18)

$$u = 0{,}62;$$

— fluxul luminos total al lămpilor de instalat (rel. 2.68)

$$\Phi'_0 = \frac{200 \cdot 50 \cdot 25 \cdot 1{,}8}{0{,}62} = 726\,000 \text{ lm};$$

— fluxul luminos al lămpilor dintr-un corp (rel. 2.69)

$$\Phi_l' = \frac{726\,000}{91} \simeq 8\,000 \text{ lm};$$

— tipul lămpii fluorescente (tab. 2.11 și 2.10)

$$\text{LFA } 65/2\ X, \qquad \Phi_l = 2\,800 \text{ lm}, \quad T_c = 3\,800 °\text{K};$$

— numărul lămpilor dintr-un corp

$$n = \frac{\Phi_l'}{\Phi_l} = \frac{8000}{2800} \simeq 3.$$

5. Recalcularea nivelului mediu de iluminare (rel.2.68)

$$E_{med}' = \frac{3 \cdot 91 \cdot 2\,800 \cdot 0{,}62}{50 \cdot 25 \cdot 1{,}8} = 210 \text{ lx}.$$

2.4.6. Proiectarea instalațiilor de iluminat exterior

Calculul instalațiilor de iluminat exterior cuprinde aceleași etape ca și în cazul instalațiilor de iluminat interior, în cele ce urmează fiind prezentate elementele caracteristice.

Sistemul de iluminat este local și direct în majoritatea cazurilor, din cauza lipsei suprafețelor înconjurătoare care să contribuie la iluminarea suprafeței de utilizare. Culoarea luminii este mai puțin importantă decît în cazul iluminatului interior, deoarece specificul activităților ce se desfășoară în exterior nu necesită o redare corectă a culorilor. Se pot utiliza atît lămpi cu incandescență cît și lămpi cu descărcări în gaze sau vapori metalici. Lămpile cu incandescență se utilizează în special la iluminatul străzilor secundare și la iluminatul cu proiectoare; în cazul iluminării șoselelor, a străzilor principale, a fațadelor sau a monumentelor de arhitectură, este preferabilă utilizarea lămpilor cu vapori de mercur sau de sodiu, din cauza măririi percepției contrastelor și a formelor.

Corpurile de iluminat se aleg în funcție de izvorul de lumină considerat. Pentru iluminatul terenurilor întinse, al fațadelor și al monumentelor, sau pentru iluminarea intensă a anumitor suprafețe sau obiecte așezate la distanțe relativ mari, se utilizează proiectoarele.

Dat fiind că suprafețele iluminate nu contribuie prea mult la iluminarea lor reciprocă, calculele iluminărilor și luminanțelor pentru iluminatul exterior se vor efectua după metoda punct cu punct (§ 2.4.4). Pentru aceste calcule este necesar să se cunoască: curba fotometrică de repartiție a intensității luminoase a corpului de iluminat, poziția relativă a corpului de iluminat față de suprafața pe care trebuie să o ilumineze și factorul de reflexie al acestei suprafețe. În toate cazurile, corpurile de iluminat pot fi considerate drept surse luminoase punctiforme, deoarece în iluminatul exterior

Scanned with OKEN Scanner

este totdeauna satisfăcută condiţia ca dimensiunile transversale maxime ale sursei să fie de cel puţin cinci ori mai mici decît distanţa de la sursă la suprafaţa iluminată.

Din cauza repartiţiei simetrice a iluminărilor pe suprafaţa străzii, este suficientă determinarea iluminărilor pe o porţiune din această suprafaţă, iluminările pe restul suprafeţei deducîndu-se prin simetrie. În figura 2.64 sînt indicate părţile din suprafaţa străzii pe care trebuie să se determine repartiţia iluminărilor, pentru diferite moduri de aşezare a corpurilor de iluminat. În cazul în care corpurile de iluminat sînt aşezate pe un singur rînd (fig. 2.64, *a* şi *d*), iluminarea într-un punct este dată de suma iluminărilor produse de cele două corpuri de iluminat mai apropiate, iluminările date de restul corpurilor fiind neglijabile, datorită distanţelor mari între corpurile de iluminat. Pentru aşezarea în zig-zag a corpurilor (fig. 2.64, *b* şi *c*), trebuie să se considere iluminările produse de cele trei corpuri de iluminat mai apropiate; pentru aşezarea faţă în faţă a corpurilor (fig. 2.64, *c* şi *f*), iluminarea într-un punct se calculează însumînd iluminările de la patru corpuri de iluminat.

Întrucît corpurile de iluminat sînt montate în general la aceeaşi înălţime, pentru simplificarea calculelor se pot folosi curbele izolux, care exprimă variaţia iluminării în funcţie de distanţa orizontală $E = f(l)$, pentru h = constant, construite pentru un anumit corp de iluminat.

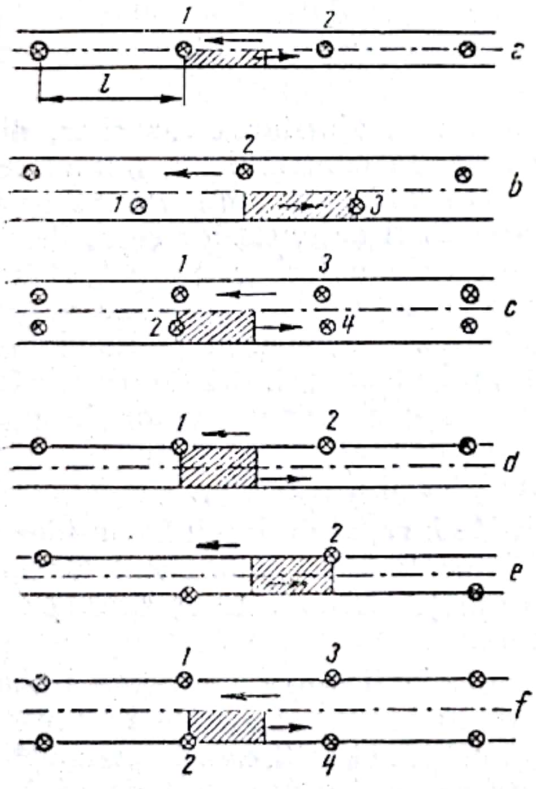


Fig. 2.64. Aşezarea corpurilor de iluminat pe străzi (pe suprafeţele haşurate se determină repartiţia iluminărilor):
a, *d* — pe un singur rînd; *b*, *e* — în zig-zag; *c*, *f* — faţă în faţă.

Pentru a se obţine curbele izolux de la mai multe corpuri de iluminat (curbele izolux cumulative), se trasează pe planul străzii curbele izolux pentru fiecare corp de iluminat (§ 2.4.4). La intersecţia acestor curbe rezultă puncte avînd iluminarea egală cu suma iluminărilor produse de fiecare corp; prin unirea punctelor de egală iluminare se obţin curbele izolux cumulative ale instalaţiei (fig. 2.65).

Satisfacerea condiţiilor de uniformitate a iluminării impune şi calculul iluminărilor verticale, determinate în planuri verticale perpendiculare pe axa străzii, la 60 cm de la suprafaţa acesteia. În calculul iluminărilor verticale se ţine seama numai de fluxurile luminoase directe ale corpurilor de iluminat situate de aceeaşi parte a planului vertical, neglijîndu-se fluxurile luminoase reflectate de pavaj, al cărui factor de reflexie are valori reduse.

Scanned with OKEN Scanner

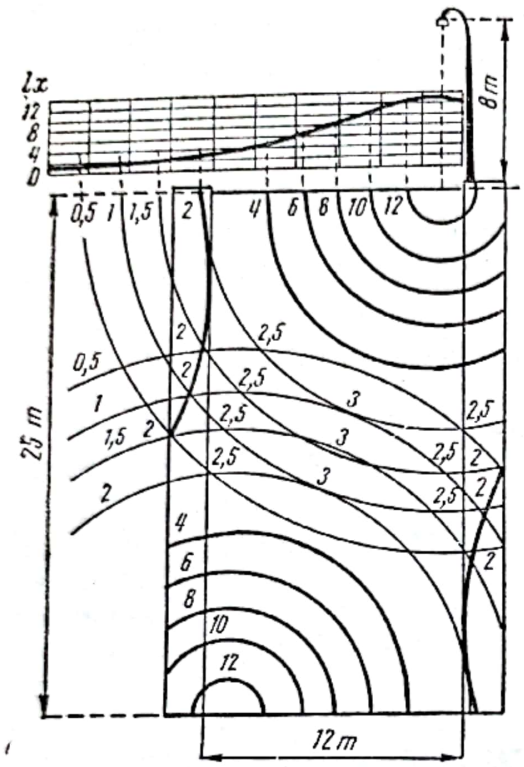


Fig. 2.65. Curbele izolux orizontale pe o stradă cu corpuri de iluminat simetrice așezate în zig-zag.

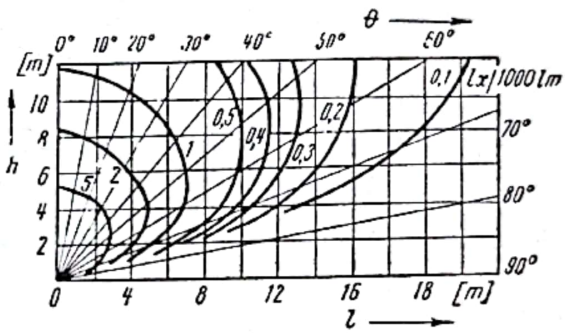


Fig. 2.66. Perechile de valori h, l corespunzătoare unor iluminări date, calculate pentru un corp de iluminat simetric utilizat la iluminatul public.

Întreținerea instalațiilor de iluminat exterior este deosebit de importantă, deoarece umiditatea atmosferică favorizează depunerea prafului, ceea ce are ca efect reducerea în unele cazuri pînă la 50% a randamentului luminos al corpurilor de iluminat. Întrucît această depreciere nu poate fi luată în considerare în calcule, deoarece valorile ei diferă mult de la un caz la altul, în funcție de regiune și de anotimp, este necesar ca curățirea corpurilor de iluminat să se facă periodic, cel puțin o dată cu înlocuirea lămpilor defecte.

În anumite situații se cere ca pentru un tip dat de corp de iluminat să se determine următoarele elemente:

— înălțimea de suspendare h pentru care la o distanță l dată, se obține o iluminare orizontală E_h impusă;

— distanța orizontală l pentru care la o înălțime de suspendare h dată, se obține o iluminare orizontală E_h. Ambele probleme se rezolvă tot cu ajutorul relației generale (2.72) scrisă sub forma

$$r = \sqrt{\frac{I_\theta \cdot \cos\theta}{k_d \cdot E_h}}. \qquad (2.98)$$

Pentru orice unghi φ (în cazul surselor simetrice) sau pentru unghiul φ ales (în cazul surselor nesimetrice), se poate calcula valoarea lui r pentru diferite valori ale lui E_h și diferite unghiuri θ. Aceste valori ale lui r, reprezentate grafic, dau naștere unor curbe de felul celor din figura 2.66. Fiecare punct al curbelor definește o pereche de valori h, l corespunzător valorii E_h respective.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 3

ELECTROTERMIE

3.1. PROBLEME GENERALE ALE INSTALAŢIILOR ELECTROTERMICE

Electrotermia se ocupă cu transformarea energiei electrice în energie termică, înglobînd totalitatea proceselor tehnologice care se realizează pe baza acestei transformări. Instalaţiile folosite pentru realizarea proceselor electrotermice, împreună cu sursele de alimentare, aparatajul de punere în funcţiune şi de reglare, se numesc instalaţii electrotermice.

Avantajele pe care le prezintă încălzirea electrică faţă de încălzirea cu flacără sînt următoarele:

— concentrarea unei puternice surse termice într-un spaţiu restrîns, cu obţinerea unor temperaturi ridicate;

— inexistenţa produselor arderii şi deci posibilitatea de ermetizare a spaţiului de lucru;

— uşurinţa reglării regimului de temperatură în conformitate cu cerinţele procesului tehnologic;

— automatizarea simplă şi sigură în funcţionare;

— îmbunătăţirea condiţiilor de lucru şi a gradului de utilizare a suprafeţelor de producţie.

Aceste avantaje au permis utilizarea instalaţiilor electrotermice în cele mai diferite procese industriale, şi anume:

— elaborarea oţelurilor şi aliajelor speciale, topirea pentru rafinare şi turnare a fontelor oţelurilor şi metalelor neferoase;

— încălzirea metalelor în vederea tratamentului termic şi a prelucrării la cald;

— producerea materialelor abrazive, a carburii de calciu, a fosfaților și nitraților, a electrografitului;
— sudarea materialelor plastice;
— topirea și tratamentul termic al sticlei și al produselor ceramice;
— uscarea, sterilizarea și prepararea produselor alimentare.

În țările dezvoltate din punct de vedere industrial, 20...45% din energia consumată în industrie este folosită în instalațiile electrotermice.

3.1.1. Clasificarea instalațiilor electrotermice

Clasificarea instalațiilor electrotermice se face după modul de transformare a energiei electrice în căldură, deosebindu-se:

1) Încălzirea cu rezistoare, bazată pe încălzirea conductoarelor parcurse de curent electric (efectul Joule-Lenz); încălzirea este directă, dacă rezistorul este însuși materialul ce urmează a fi încălzit (fig. 3.1, *a*), sau indirectă în cazul în care energia termică degajată de rezistoare se transmite prin conducție, convecție și radiație materialului destinat încălzirii (fig. 3.1, *b*).

2) Încălzirea prin inducție, bazată pe efectul Joule-Lenz al curenților electrici induși de către un cîmp magnetic alternativ în metalul ce urmează a fi încălzit (fig. 3.1, *c*); transmiterea căldurii în metal are loc prin conducție.

3) Încălzirea dielectrică sau capacitivă, bazată pe efectul termic al curenților de deplasare ce apar în dielectricul introdus într-un cîmp electric variabil în timp (fig. 3.1, *d*).

4) Încălzirea cu arc electric, la care transformarea energiei electrice în căldură are loc în arcul electric, fluxul termic fiind transmis prin radiație și conducție materialului destinat încălzirii; încălzirea este directă dacă arcul electric se formează între electrozi și material (fig. 3.1, *e*), sau indirectă, dacă arcul electric se stabilește între doi electrozi (fig. 3.1, *f*).

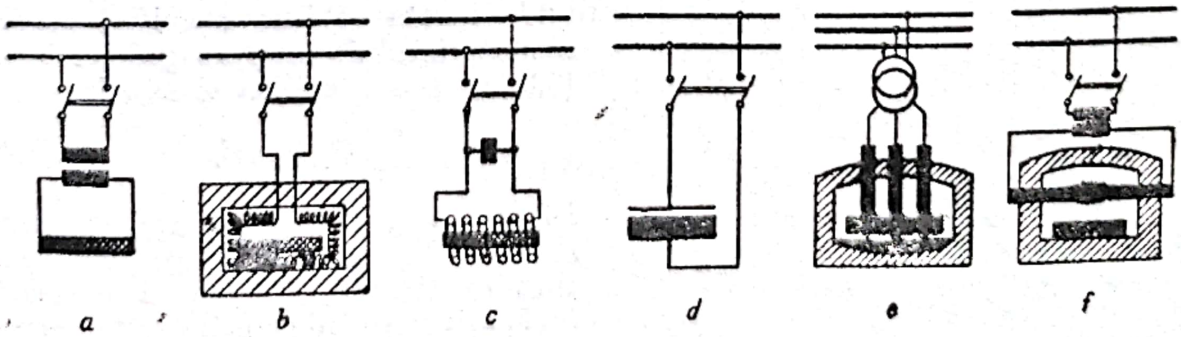


Fig. 3.1. Transformarea energiei electrice în căldură:
a — încălzirea directă cu rezistoare; *b* — încălzirea indirectă cu rezistoare; *c* — încălzirea prin inducție; *d* — încălzirea dielectrică; *e* — încălzirea directă cu arc electric; *f* — încălzirea indirectă cu arc electric.

Scanned with OKEN Scanner

5) Încălzirea cu flux de electroni, bazată pe transformarea în căldură a energiei cinetice a electronilor rapizi ce bombardează suprafaţa materialului de încălzit.

6) Încălzirea cu plasmă, la care energia arcului electric ionizează complet un gaz a cărui temperatură ajunge la valori foarte ridicate.

3.1.2. Indicatori energetici ai proceselor electrotermice

Indicatorii energetici ai proceselor electrotermice sînt: randamentul, puterea şi consumul specific de energie electrică.

Randamentul total al unei instalaţii electrotermice este

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_e \cdot \eta_l \cdot \eta_g, \tag{3.1}$$

în care:

η_t este randamentul termic, η_e — randamentul electric, η_l — randamentul reţelei de alimentare şi η_g — randamentul sursei de alimentare.

Randamentul total este cuprins între 30 şi 80%.

Randamentul termic al instalaţiei este dat de raportul

$$\eta_t = \frac{Q_u}{Q_u + Q_p}, \tag{3.2}$$

Q_u reprezentînd cantitatea de căldură utilă, necesară încălzirii materialului, iar Q_p — cantitatea de căldură pierdută prin materialele refractare şi de izolaţie termică ale construcţiei, precum şi direct de la suprafaţa materialului încălzit.

Căldura utilă necesară încălzirii unui corp de masă m (în kg), de la temperatura iniţială θ_i (în °C) la temperatura finală θ_f, este

$$Q_u = mc(\theta_f - \theta_i) \ [\mathrm{J}], \tag{3.3}$$

unde c este căldura specifică medie a materialului, în J/kg·grd; relaţia (3.3) se poate utiliza şi sub forma

$$Q_u = mi, \tag{3.4}$$

i fiind energia specifică a materialului (în J/kg sau kWh/kg), reprezentînd cantitatea de căldură necesară încălzirii masei de un kg la temperatura θ (fig. 3.2).

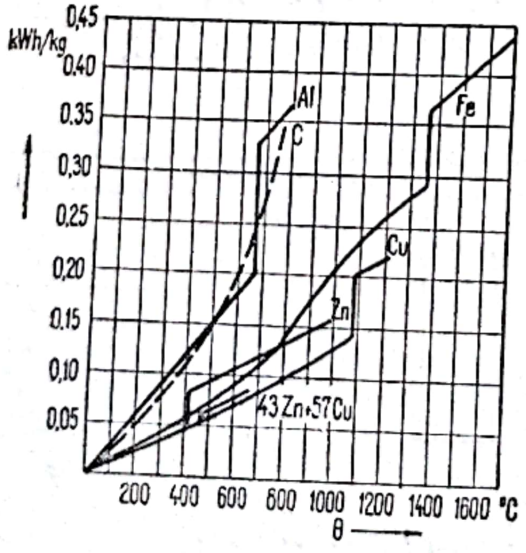


Fig. 3.2. Energia specifică necesară pentru încălzirea şi topirea metalelor.

Căldura pierdută depinde de mărimea instalaţiei de încălzire, de mate-

rialele refractare și termoizolante utilizate și de temperatura corpului ce se încălzește. Relațiile de calcul sînt expuse în § 3.1.3.

Valorile uzuale ale randamentului termic sînt 70 ... 95%.

Ținînd seama de pierderile de energie Q_e ce se produc în elementele încălzitoare (rezistoare, bobine, electrozi etc.), *randamentul electric* al instalației este

$$\eta_e = \frac{Q_u + Q_p}{Q_u + Q_p + Q_e}, \tag{3.5}$$

$Q_u + Q_p$ fiind căldura dezvoltată de elementele încălzitoare.

În general, cantitatea de căldură Q produsă de puterea electrică P în intervalul de timp t necesar încălzirii este

$$Q = Pt, \tag{3.6}$$

astfel că randamentul electric poate fi exprimat sub forma

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{P_2}{P}, \tag{3.7}$$

P_1 fiind puterea pierdută în elementele încălzitoare, P_2 — puterea ce se transformă în căldură în elementele încălzitoare, P — puterea instalației electrotermice (a cuptorului), neținînd cont de randamentul rețelei și al sursei de alimentare.

Randamentul electric are valori mari la încălzirea prin rezistoare (80... ...95%) și valori scăzute la încălzirea prin inducție (60...80%).

Consumul specific de energie electrică Q_s al instalației electrotermice (inclusiv rețeaua și sursa de alimentare) reprezintă un indicator energetic de a cărui valoare depinde economicitatea instalației electrotermice. Acest indicator este exprimat prin consumul total de energie electrică raportat la unitatea de măsură a producției instalației (bucăți, kg, tone etc.), conform relației

$$Q_s = \frac{Pt}{m} = \frac{i}{\eta}. \tag{3.8}$$

Consumul specific de energie este influențat în mare măsură de pierderile de căldură, valori scăzute obținîndu-se prin realizarea unei izolații termice corespunzătoare.

3.1.3. Transmiterea căldurii la cuptoarele electrice

Indicatorii energetici ai instalațiilor electrotermice se determină în urma calculului termic bazat pe legile de transmitere (propagare) a căldurii.

Transmiterea căldurii reprezintă în ansamblu un proces complicat; pentru ușurința studierii și efectuării calculelor, acest proces se divide în fenomene mai simple, distingîndu-se trei forme de transmitere a căldurii: prin conducție; prin convecție; prin radiație.

Scanned with OKEN Scanner

a. **Transmiterea căldurii prin conducție.** Conducția este procesul de transmitere a căldurii în interiorul unui corp cu o repartiție neuniformă a temperaturii sau între corpuri cu temperaturi diferite, aflate în contact direct. În cazul cuptoarelor electrice, conducția prezintă importanță la calculul căldurii pierdute prin pereții cuptoarelor și a căldurii transmise în materialele ce se încălzesc.

Transmiterea căldurii prin conducție este legată de repartiția în spațiu și variația în timp a temperaturii θ, adică de cîmpul de temperatură $\theta = f(x, y, z, t)$.

Dacă temperatura diferitelor puncte ale mediului nu variază în timp, cîmpul de temperatură se numește staționar. În acest caz cantitatea de căldură transmisă în unitatea de timp, adică *fluxul termic* este

$$\Phi = \frac{Q}{t} \quad [\mathrm{W}]. \tag{3.9}$$

Relațiile de calcul a fluxului termic transmis prin conducție sînt indicate în tabela 3.1.

În formulele tabelei 3.1, λ reprezintă conductivitatea termică medie (în W/m grd), fiind un coeficient ce caracterizează capacitatea corpurilor de a transmite căldura, depinzînd de materialul corpurilor și de temperatură — tabelele 3.2, 3.4 și 3.5; A_m este suprafața de calcul a peretelui.

Raportînd fluxul termic Φ la suprafața A pe care o străbate se obține *densitatea fluxului termic:*

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad [\mathrm{W/m^2}].$$

Prin analogie cu rezistența electrică, rezistența termică este cîtul dintre diferența de temperatură și fluxul termic întreținut de această diferență de temperatură

$$R_t = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Phi} \quad [\mathrm{grd/W}].$$

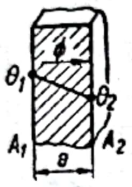
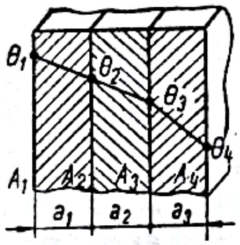
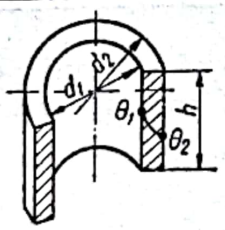
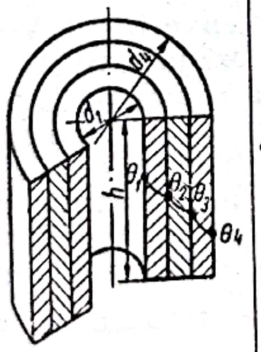
Determinarea prin calcul a variației temperaturii, în cazul cîmpului nestaționar de temperatură (de exemplu la încălzirea și răcirea corpurilor în cuptor), conduce la relații matematice complicate și dificil de aplicat [17]; din acest motiv se recurge la rezultate experimentale. În figura 3.18 este indicată variația în timp a temperaturii unei piese, pentru un anumit regim termic al cuptorului electric.

b. **Transmiterea căldurii prin convecție.** Convecția este procesul de transmitere a căldurii între un fluid și un corp solid. În cazul cuptoarelor electrice convecția prezintă importanță la calculul termic al cuptoarelor funcționînd la temperatură joasă (sub 700°C), la determinarea pierderilor de căldură prin pereții cuptoarelor și a căldurii evacuate în instalațiile de răcire cu aer sau apă.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.1

Relații pentru calculul transmiterii căldurii prin conducție

Forma și materialul corpului	Figura	Fluxul termic Φ în W	Variația temperaturilor	Observații
Perete plan omogen		$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{a}{\lambda A_m}}$	$\theta_2 = \theta_1 - \Phi \cdot \frac{a}{\lambda A_m}$	Pentru $\frac{A_2}{A_1} < 2$ $A_m = \frac{A_1 + A_2}{2}$ Pentru $\frac{A_2}{A_1} > 2$ $A_m = \sqrt{A_1 \cdot A_2}$
Perete plan neomogen (avînd n straturi)		$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum_{k=1}^{n} \frac{a_k}{\lambda_k \cdot A_{m_k}}}$	$\theta_{k+1} = \theta_1 - \Phi \sum_{1}^{k} \frac{a_k}{kA_{m_k}}$	Pentru $\frac{A_{k+1}}{A_k} < 2$ $A_{m_k} = \frac{A_k + A_{k+1}}{2}$ Pentru $\frac{A_{k+1}}{A_k} > 2$ $A_{m_k} = \sqrt{A_k \cdot A_{k+1}}$
Perete cilindric omogen		$\Phi = \frac{\pi h(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$	$\theta_2 = \theta_1 - \Phi \frac{1}{2\pi\lambda h} \ln \frac{d_2}{d_1}$	Pentru $\frac{d_2}{d_1} < 2$ calculul Φ se poate face și cu relația de la peretele plan omogen
Perete cilindric neomogen (avînd n straturi)		$\Phi = \frac{\pi h(\theta_1 - \theta_{n+1})}{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k}}$	$\theta_{k+1} = \theta_1 - \Phi \frac{1}{\pi h} \sum_{1}^{k} \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k}$	Pentru $\frac{d_{k+1}}{d_k} < 2$ calculul Φ se poate face și cu relația de la peretele plan neomogen

Convecția naturală apare datorită circulației naturale a fluidului: straturile mai calde avînd greutatea specifică mai mică se ridică, iar cele reci cu greutate specifică mai mare, coboară. Dacă circulația fluidului se datorește unei acțiuni exterioare (ventilare, pompare), convecția este forțată.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.2

Conductivitatea termică a metalelor [50]

Denumirea	Temperatura θ în °C	Conductivitatea termică λ, în W/m°C
Oţel	0	59,3
	200	52,3
	400	44,2
	600	37,2
	800	29,0
Oţel cu crom (0,8% Cr, 0,2%C)	20	39,5
Oţel crom-nichel (17—19% Cr, 8% Ni, 0,1—0,2%C)	20	14,5
	200	17,2
	500	20,9
Aluminiu (99,75% Al)	20	229
Duraluminiu (94—96%Al, 3—5% Cu, 0,5% altele)	20	165
	100	181
	200	194
Bronz	20	64
Cupru electrolitic	20	395
Cupru	20	372
Alamă	20	81,5...116

Fluxul termic transmis prin convecţie, între suprafaţa unui perete solid aflat la temperatura θ_1 şi fluidul care-l spală aflat la temperatura θ_2, este dat de legea lui Newton

$$\Phi = \alpha_c(\theta_1 - \theta_2)A \quad [\mathrm{W}], \tag{3.10}$$

unde:

α_c este coeficientul de transmitere a căldurii prin convecţie, în W/m² · grd;

A — suprafaţa pe care are loc schimbul de căldură prin convecţie, în m².

Valoarea lui α_c depinde de viteza de deplasare a fluidului, de temperaturile peretelui şi fluidului, de dimensiunile geometrice şi forma peretelui, de proprietăţile fizice ale fluidului (căldura specifică, conductivitatea termică, densitatea, vîscozitatea). Pentru determinarea coeficientului α_c se indică o serie de relaţii empirice în literatura de specialitate [7], iar lucrările [1] şi [17] permit un calcul mai exact bazat pe criteriile de similitudine.

Raportul $\frac{1}{\alpha_c A}$, în grd/W, reprezintă rezistenţa termică de convecţie.

c. **Transmiterea căldurii prin radiaţie.** Dacă un corp este încălzit, o parte a energiei sale termice se transformă în energie radiantă, transportată de radiaţii electromagnetice de o anumită lungime de undă, numite radiaţii infraroşii sau calorice.

Transmiterea căldurii prin radiaţie are importanţă în calculul termic al cuptoarelor funcţionînd la temperatură înaltă (peste 700°C), la determi-

Scanned with OKEN Scanner

narea pierderilor de căldură prin ușile și capacele deschise ale cuptoarelor și de la suprafața pieselor încălzite sau a băilor de metal topit.

Conform legii lui Stefan-Boltzmann, fluxul termic transmis prin radiație între două corpuri de suprafață A_1 și A_2 (în m²), aflate la temperaturile T_1 și T_2 (în °K), este

$$\Phi = C_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_{12} \quad [\mathrm{W}], \tag{3.11}$$

în care C_r este coeficientul redus de radiație:

$$C_r = C_n \cdot \varepsilon_r = \frac{C_n}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K^4}} \right]; \tag{3.12}$$

$C_r = 5{,}67 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \, °K^4}}$ — constanta de radiație a corpului negru;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — gradele în înnegrire ale corpurilor (tab. 2.3);

ε_r — gradul redus de înnegrire;

$A_{12} = \varphi_{12} A_1 = \varphi_{21} A_2$ — suprafața reciprocă de radiație, în m²;

φ_1, φ_2 — coeficienți care reprezintă fracțiunea din radiația totală a unui corp care ajunge pe celălalt corp; pentru o serie de cazuri particulare valorile acestor coeficienți sînt date în lucrarea [48].

În cazul radiației între:

— doi pereți plan-paraleli

$$A_{12} = A_1 = A_2; \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} = 1; \tag{3.13}$$

$$\Phi_{12} = C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_1, \tag{3.14}$$

cu

$$C_{12} = \frac{C_n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \tag{3.15}$$

— doi pereți cilindrici coaxiali ($A_1 < A_2$)

$$A_{12} = A_1; \quad \varphi_{12} = 1, \quad \varphi_{21} = \frac{A_1}{A_2}; \tag{3.16}$$

fluxul termic este exprimat de relația (3.14) în care coeficientul redus de radiație

$$C_{12} = \frac{C_n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}; \tag{3.17}$$

această relație poate fi utilizată și în cazul a două corpuri, cînd unul dintre ele îl cuprinde pe celălalt, caz în care A_1 trebuie să fie întotdeauna suprafața cea mai mică.

Scanned with OKEN Scanner

Gradul de înnegrire ε al corpurilor depinde de material şi de calitatea suprafeţei, avînd valori ridicate pentru suprafeţele mate, de culoare închisă şi valori scăzute pentru suprafeţele lucioase, de culoare deschisă. Rezultă următoarele concluzii:

— culorile deschise împiedică transmiterea căldurii, în timp ce culorile închise o favorizează;

— pentru a păstra căldura, cuptoarele se vopsesc în culori deschise (vopsele pe bază de aluminiu);

— instalaţiile şi piesele ce trebuie să disipeze căldura se vor vopsi în culori închise şi mate.

d. **Transmiterea complexă a căldurii.** Cele trei fenomene analizate anterior reprezintă în realitate componente ale procesului de transmitere complexă a căldurii desfăşurîndu-se simultan şi influenţîndu-se reciproc.

Fluxul termic complex transmis între un corp solid avînd suprafaţa A, temperatura θ_1 şi un fluid aflat la temperatura θ_2, în ipoteza neglijării conducţiei termice, este

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r, \tag{3.18}$$

în care fluxul termic de convecţie Φ_c este dat de relaţia (3.10), iar fluxul termic de radiaţie Φ_r — de relaţia (3.11), în care $A_{12} = A$. Deoarece $T_1 - T_2 = \theta_1 - \theta_2$, notînd cu

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r = \alpha_c + \frac{C_r}{100}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^2 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^2\right]\left(\frac{T_1}{100} + \frac{T_2}{100}\right) \tag{3.19}$$

coeficientul de transmitere a căldurii prin convecţie şi radiaţie, în W/m².grd, rezultă pentru fluxul termic complex următoarea expresie

$$\Phi = \alpha(\theta_1 - \theta_2)A \quad [\mathrm{W}]. \tag{3.20}$$

Valorile coeficientului α depind de material şi de temperatură, după cum se observă din tabela 3.3 şi figura 3.3.

Relaţia 3.20 permite reducerea transmiterii complexe a căldurii prin convecţie şi radiaţie la o transmitere simplă prin convecţie. Raportul $1/\alpha A$ [grad/W] reprezintă rezistenţa termică complexă.

Tabela 3.3

Coeficientul α de transmitere a căldurii prin convecţie şi radiaţie, pentru pereţi din metal vopsit sau cărămidă [38]

θ, în °C	60	100	150	200	250	300	250	400	500
α, în W/m² °C	11,6	14,4	17,0	20,2	23,2	26,4	30,3	34,6	44,5

Scanned with OKEN Scanner

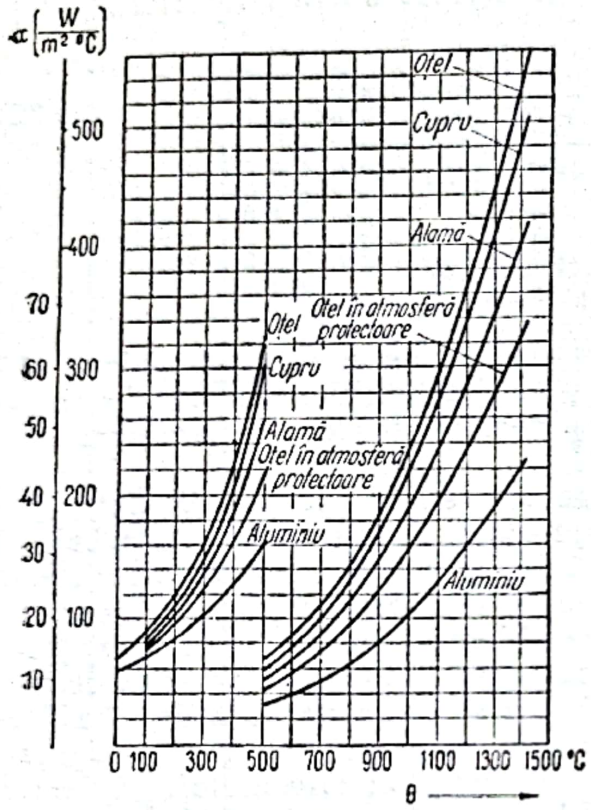


Fig. 3.3. Coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție și radiație pentru diferite materiale.

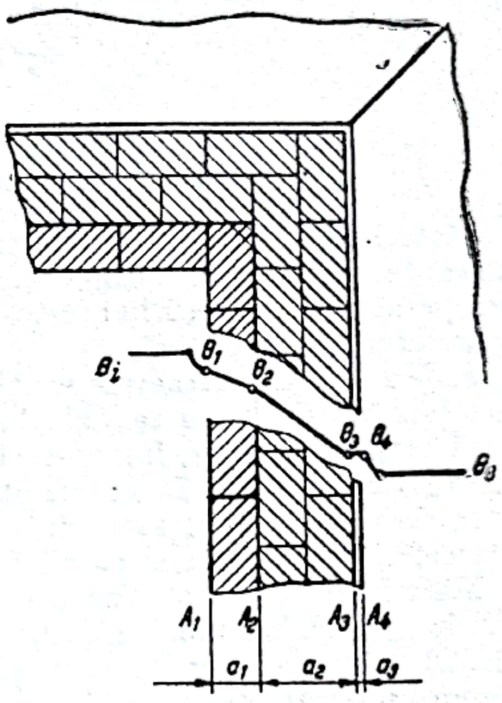


Fig. 3.4. Secțiune prin pereții unui cuptor cu rezistoare.

Fluxul termic transmis printr-un perete plan format din n straturi (fig. 3.4) spălat în interior de un fluid (gaz încălzit, metal topit) aflat la temperatura θ_i, iar în exterior de aerul aflat la temperatura θ_e, este

$$\Phi = \frac{\theta_i - \theta_e}{\Sigma R_t} = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{\alpha_i A_i} + \sum_1^n \frac{a_k}{\lambda_k A_{mk}} + \frac{1}{\alpha_e A_e}} \text{ [W]}, \qquad (3.21)$$

unde: ΣR_t este suma rezistențelor termice;

A_i, A_e — suprafața interioară, respectiv exterioară a peretelui;

a_k — grosimea stratului k;

A_{mk} — suprafața de calcul a stratului k;

α_i, α_e — coeficientul interior, respectiv exterior de transmitere a căldurii prin convecție și radiație;

λ_k — conductivitatea termică medie a stratului k.

În cazul peretelui cilindric neomogen format din n straturi (tab. 3.1) fluxul termic este:

$$\Phi = \frac{(\theta_i - \theta_e)\pi h}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} + \frac{1}{\alpha_e d_e}} \text{ [W]}. \qquad (3.22)$$

3.1.4. Materiale utilizate în construcția cuptoarelor electrice

Materialele utilizate în construcţia cuptoarelor electrice trebuie să aibă anumite proprietăţi, pentru a corespunde condiţiilor de funcţionare la temperaturi ridicate. Din acestea fac parte materialele refractare şi materialele termoizolante.

a. **Materialele refractare** se utilizează la construcţia căptuşelilor interioare ale camerei de lucru sau ale băii cuptorului. Aceste materiale trebuie să aibă temperatura de înmuiere între 1 580 şi 1 770 °C, să aibă rezistenţă mecanică suficientă la temperaturi înalte, să suporte variaţii de temperatură fără a se fisura, să nu intre în combinaţii chimice cu materialul sau atmosfera din cuptor şi să aibă conductivitate termică şi electrică redusă.

Materialele care satisfac aceste condiţii se obţin pe bază de bioxid de siliciu (SiO_2), alumină (Al_2O_3) sau argilă refractară, oxid de magneziu (MgO), cărbune, grafit, carborund şi compuşi ai zirconiului. Cele mai importante caracteristici ale materialelor refractare utilizate în cuptoarele electrice sînt date în tabela 3.4.

Materialele refractare se folosesc sub formă de cărămizi, blocuri, tuburi, praf etc.

Din categoria materialelor refractare fac parte şi materialele cu rezistenţă mecanică mare, din care se confecţionează piesele aflate în zonele de temperatură ridicată ale cuptorului, ca: creuzete, plăci de vatră, suporţi pentru pereţi şi boltă, ecrane, dispozitive pentru deplasarea sau susţinerea pieselor în cuptor etc. Aceste materiale trebuie să-şi păstreze rezistenţa mecanică ridicată la temperaturi înalte şi să suporte diferite prelucrări, ca tăiere, sudare, laminare etc.

Principalele materiale refractare cu rezistenţă mecanică mare sînt obţinute prin alierea oţelului şi a fontei cu crom sau crom-nichel.

b. **Materialele termoizolante** se întrebuinţează la zidăria cuptoarelor, proprietăţile impuse acestor materiale fiind conductivitate termică redusă şi o temperatură de înmuiere suficient de ridicată. Cele mai răspîndite materiale termoizolante sînt diatomita (sub formă de praf sau cărămizi), vatele de sticlă sau zgură, azbestul combinat cu mică sau argilă refractară (sub formă de plăci, cărămizi, praf de umplutură) şi şamotele uşoare.

În tabela 3.5. sînt indicate principalele caracteristici ale celor mai răspîndite materiale termoizolante.

Structura pereţilor cuptoarelor electrice depinde de temperatura de lucru după cum urmează:

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.4

Proprietăţile materialelor refractare [3]

Denumirea materialului	Densitatea ρ' t/m³	Conductivitatea termică λ W/m°C	Temperatura maximă de utilizare °C	Domeniul de utilizare
Şamotă	1,8...1,9	$0{,}835 + 0{,}58 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1350...1450	Cuptoare cu elemente încălzitoare, izolaţia cuptoarelor cu arc şi pentru reducerea minereurilor
Şamotă uşoară	1,3	$0{,}501 + 0{,}16 \cdot 10^{-3}\theta$	1300	Cuptoare termice cu rezistoare
Şamotă spongioasă	0,8	$0{,}29 + 0{,}23 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1300	Idem
Şamotă suprauşoară	0,35...0,4	$0{,}093 + 0{,}16 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1300	Idem
Silică	1,9...1,95	$0{,}93 + 0{,}7 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1700	Arcade şi bolţi la cuptoarele cu arc şi pentru reducerea minereurilor. Căptuşeala cuptoarelor pentru procedeul acid.
Silimanită (mulită)	2,2...2,4	$1{,}68 - 0{,}232 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1650	Dispozitive pentru cuptoare de temperatură ridicată. Căptuşeala cuptoarelor cu inducţie.
Corund (alund)	2,3...2,6	$2{,}1 + 1{,}76 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1600...1700	Dispozitive pentru cuptoarele de temperatură ridicată.
Magnezită	2,6...2,8	$4{,}65 - 1{,}64 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1650...1700	Căptuşeala cuptoarelor pentru procedeul bazic şi a unor cuptoare pentru reducerea minereurilor.
Cromomagnezită	2,75...2,85	1,86...1,98 (0...600°C)	1700	Căptuşeala cuptoarelor bazice şi pentru reducerea minereurilor.
Cărbune	1,35...1,6	$23{;}2 + 34{,}8 \cdot 10^{-3}\,\theta$ (sub 1000°C)	2000	Căptuşeala cuptoarelor pentru reducerea minereurilor, dispozitive ale cuptoarelor cu temperatură înaltă.
Grafit	1,6	$163 - 10 \cdot 10^{-3}\,\theta$	2000	Dispozitivele pentru cuptoarele de temperatură ridicată.
Zirconiu	3,2...3,3	$2{,}1 + 1{,}76 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1600...1870	Idem
Carborund	2,3...2,6	$21 - 10{,}5 \cdot 10^{-3}\,\theta$	1400...1500	Idem

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.5

Proprietăţile materialelor termoizolante [3]

Denumirea materialului	Densitatea ρ' t/m³	Conductivitatea termică λ W/m°C	Temperatura maximă de utilizare °C
Diatomită	0,7	$0,16 + 0,31 \cdot 10^{-3}\,\theta$	900
Praf de diatomită	0,55	$0,12 + 0,26 \cdot 10^{-3}\theta$	900
Vată de sticlă	0,25...0,30	$0,037 + 0,255 \cdot 10^{-3}\,\theta$	600
Vată de zgură (minerală)	0,30	$0,07 + 0,157 \cdot 10^{-3}\,\theta$	750
Carton de azbest	0,90	$0,16 + 0,17 \cdot 10^{-3}\,\theta$	500
Plăci de azbociment de izolaţie	0,30	$0,07 + 0,175 \cdot 10^{-3}\,\theta$	500

— cuptoarele cu temperatură de lucru pînă la 350 °C nu au stratul de material refractar;

— dacă temperatura de lucru este în limitele 400....1 000 °C, peretele cuptoarelor prezintă un strat refractar şi unul termoizolant;

— pînă la 1 200 °C peretele cuptorului are un strat din material refractar şi mai multe straturi din materiale termoizolante.

Consolidarea construcţiei cuptorului se obţine cu ajutorul unei carcase exterioare executate din profile şi tablă de oţel.

Relaţiile de calcul a fluxurilor termice transmise (§ 3.1.3) permit stabilirea grosimii straturilor ce formează pereţii cuptorului, respectiv căptuşeala refractară, izolaţia termică şi carcasa, astfel încît temperatura exterioară a cuptorului să fie cît mai redusă. Pentru cuptoarele funcţionînd la temperaturi pînă la 1 300 °C temperatura exterioară nu va depăşi 40....60 °C; la cuptoarele de topit fontă, oţel şi minereuri, temperatura exterioară poate ajunge la 150....400 °C.

Tendinţele în construcţia izolaţiei termice a cuptorului urmăresc mărirea rezistenţei termice prin:

— micşorarea conductivităţii termice λ obţinută printr-o judicioasă alegere a materialului termoizolant;

— mărirea grosimii izolaţiei termice, care constituie obiectul unor calcule tehnico-economice, avînd drept scop obţinerea grosimii optime a acesteia.

Exemplu: Pereţii unui cuptor electric cu rezistoare cu funcţionare intermitentă au structura indicată în figura 3.4.

— căptuşeala refractară din cărămizi de şamotă 250 × 150 × 65 mm;
— izolaţia termică din cărămizi de diatomită 250 × 150 × 65 mm;
— carcasă exterioară din tablă de oţel vopsită.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.6

Exemplu de calcul a temperaturilor pereților cuptorului

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Temperatura medie a stratului k	$\theta_{mk} = \frac{\theta_k + \theta_{k+1}}{2}$	$\theta_{m_1} = \frac{1050 + 800}{2}$	925°C
		$\theta_{m_2} = \frac{800 + 60}{2}$	430°C
Conductivitatea termică medie a stratului k	(tab. 3.4)	$\lambda_{m_1} = 0{,}835 + 0{,}58 \cdot 10^{-3} \cdot 925$	1,371 W/m°C
	(tab. 3.5)	$\lambda_{m_2} = 0{,}16 + 0{,}31 \cdot 10^{-3} \cdot 430$	0,29 W/m°C
Suprafețele straturilor	A_1	$A_1 = 2.\ (0{,}8 \cdot 0{,}6 + 0{,}6 \cdot 0{,}4 + 0{,}4 \cdot 0{,}8)$	2,08 m²
	A_2	$A_2 = 2\ .\ (1{,}1 \cdot 0{,}9 + 0{,}9 \cdot 0{,}7 + 0{,}7 \cdot 1{,}1)$	4,78 m²
	A_3	$A_3 = 2.\ (1{,}7 \cdot 1{,}5 + 1{,}5 \cdot 1{,}3 + 1{,}3 \cdot 1{,}7)$	13,42 m²
	A_4	$A_4 = 2.\ (1{,}706 \cdot 1{,}506 + 1{,}506 \cdot 1{,}306 + 1{,}306 \cdot 1{,}706)$	13,52 m²
Suprafețele de calcul	tab. 3.1) $A_2/A_1 > 2$ $A_{m_1} = \sqrt{A_1 \cdot A_2}$	$A_{m_1} = \sqrt{2{,}08 \cdot 4{,}78}$	3,13 m²
	$A_3/A_2 > 2$ $A_{m_2} = \sqrt{A_2 \cdot A_3}$	$A_{m_2} = \sqrt{4{,}78 \cdot 13{,}42}$	7,98 m²
Fluxul termic transmis prin pereții cuptorului	(3.21) $\alpha = 11{,}6$ W/m²°C (tab. 3.3)	$\Phi = \frac{1050 - 60}{\frac{0{,}15}{1{,}371 \cdot 3{,}13} + \frac{0{,}3}{0{,}29 \cdot 7{,}98} + \frac{1}{11{,}6 \cdot 13{,}52}}$	6010 W
Temperaturile pereților	(tab. 3.1.) $\theta_2 = \theta_1 - \Phi \frac{a_1}{\lambda_1 A_{m_1}}$	$\theta_2 = 1050 - 6010 \frac{0{,}15}{1{,}371 \cdot 3{,}13}$	840°C (+5%)
	$\theta_3 = \theta_2 - \Phi \frac{a_2}{\lambda_2 A_{m_2}}$	$\theta_3 = 840 - 6010 \frac{0{,}30}{0{,}29 \cdot 7{,}98}$	58°C (−3%)
Temperatura aerului în exteriorul cuptorului	(3.20) $\theta_{ext} = \theta_3 - \Phi \frac{1}{\alpha A_4}$	$\theta_{ext} = 58 - 6010 \frac{1}{11{,}6 - 13{,}52}$	20°C

Dimensiunile interioare ale camerei cuptorului sînt 0,8 × 0,6 × 0,4 m, iar ale straturilor pereților $a_1 = 0{,}15$m, $a_2 = 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}30$ m, $a_3 = 0{,}003$ m. Considerăm cuptorul ca un paralelipiped, cu aceleași grosimi pentru cei șase pereți ai săi.

Temperatura peretelui interior al cuptorului este $\theta_i \approx \theta_1 = 1\,050$°C, temperatura exterioară a căptușelii refractare $\theta_2 = 800$°C (aleasă), iar

temperatura exterioară a izolației termice $\theta_3 = 60\,°C$ (impusă). Neglijînd căderea de temperatură în carcasa exterioară a cuptorului ($\theta_4 \simeq \theta_3$), se cere să se verifice temperaturile alese sau impuse anterior. Dacă temperaturile rezultate prin calcul diferă de cele alese cu mai mult de 5%, calculele se reiau cu alte valori pentru aceste temperaturi.

Calculele sînt grupate în tabela 3.6.

3.1.5. Măsurarea temperaturii

Pentru respectarea regimului de temperatură impus de procesul tehnologic al încălzirii este necesar un aparat de măsurare a temperaturii. Aparatele care se pun în contact cu substanța a cărei temperatură urmează a fi determinată, se numesc termometre de contact; din această categorie fac parte termometrele de dilatare, cu rezistoare și cu termocupluri.

Cînd nu este posibil contactul direct, deoarece temperatura este foarte înaltă sau punctul în care se măsoară nu este accesibil dintr-un motiv oarecare, pentru măsurarea temperaturii se utilizează termometrele cu radiație (pirometre).

a) Termometrele de dilatare se bazează pe dilatarea metalelor (sub formă de tije sau plăcuțe bimetalice), a lichidelor (mercur, alcool) sau a gazelor (azot, heliu, eter). Aceste termometre se utilizează pentru măsurarea temperaturilor pînă la circa 600 °C.

b) Termometrele cu rezistoare se bazează pe modificarea rezistenței electrice a unui rezistor metalic în funcție de temperatură, conform relației

$$R_\theta = R_0(1 + k_\rho\theta) \quad [\Omega], \tag{3.23}$$

în care: R_θ este rezistența la temperatura θ, în Ω;
R_0 — rezistența la 0 °C, în Ω;
k_ρ — coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura, în $1/°C$.

Rezistoarele termometrelor se confecționează din nichel, platină sau cupru, principalele caracteristici fiind date în tabela 3.7.

În industrie se utilizează construcții standardizate de termometre (fig. 3.5), rezistoarele fiind introduse într-o armătură de protecție împotriva influențelor mecanice și chimice.

Măsurarea rezistenței se face în mai multe moduri, utilizînd:

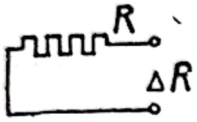
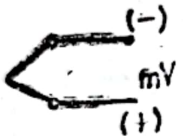
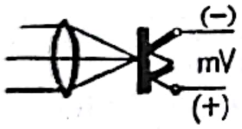
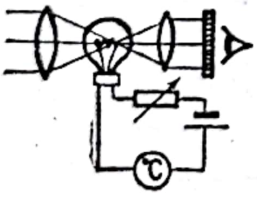
— puntea Wheatstone neechilibrată (fig. 3.6);

— puntea cu autocompensare (fig. 3.7), pentru măsurarea și înregistrarea automată a temperaturii; tensiunea continuă de dezechilibru ΔU este transformată într-o tensiune alternativă $U\sim$, care în urma amplificării (U_c), este aplicată unui motor bifazat. Acesta deplasează cursorul rezistorului variabil R_v, gradat în °C, în sensul restabilirii echilibrului punții;

— logometrul magnetoelectric cu bobine încrucișate sau în T (fig. 3.8). Rezistoarele de compensație permit fixarea rezistenței totale a circuitului termometrului la valoarea pentru care au fost etalonate aparatele indicatoare (uzual 100 Ω).

Tabela 3.7

Principalele caracteristici ale termometrelor electrice [28]

Termometru	Material	Limitele de temperatură, °C	Mărimi caracteristice
 Termometru cu rezistoare	Ni Pt Cu	−200...+150 −200...+550 −40 ...+120	$\Delta R \simeq 6\Omega/10$ grd $\Delta R \simeq 3{,}85\ \Omega/10$ grd $\Delta R \simeq 2{,}26\Omega/10$ grd
 Termometru cu termocuplu	Cu — Constantan Fe—Constantan NiCr—Ni PtRh—Pt	−200...+ 600 −200...+ 900 −200...+1200 −200...+1600	$\Delta E \simeq 5{,}0$ mV/100°C $\Delta E \simeq 5{,}6$ mV/100°C $\Delta E \simeq 4{,}1$ mV/100°C $\Delta E \simeq 1{,}2$ mV/100°C
 Termometru cu radiație totală		pînă la 2000°C	10...30 mV la temperatură maximă
 Termometru cu radiație parțială		Pînă la 3500°C	

Precizia de măsurare a termometrelor electrice depinde în primul rînd de montarea lor corectă; termometrul trebuie să fie suficient introdus (minimum 250 mm) în mediul a cărui temperatură se măsoară, iar circulația gazelor sau aerului să fie cît mai redusă în apropierea termometrului.

Termometrele cu semiconductoare se bazează pe variația cu temperatura a rezistenței termistoarelor cu conducție pur electronică, domeniul de utilizare fiind −70... +300°C.

Scanned with OKEN Scanner

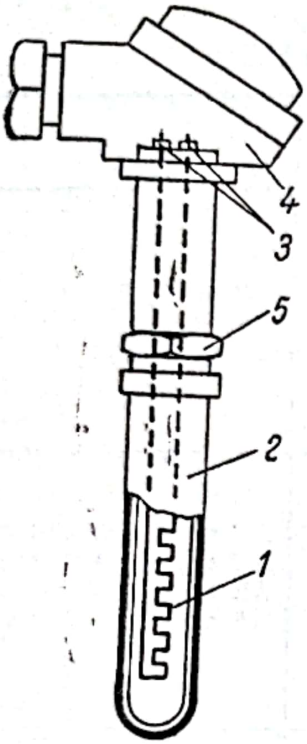
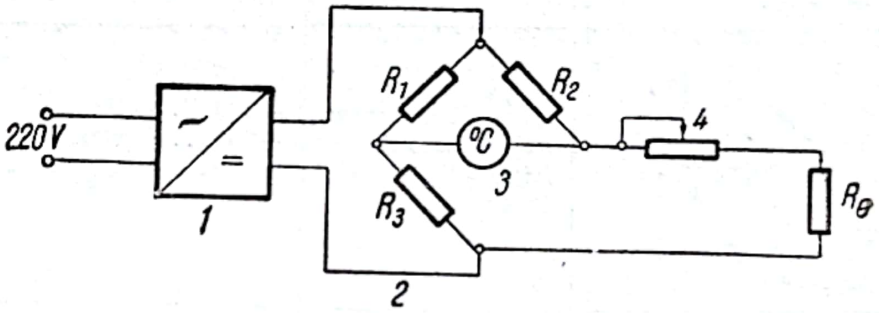


Fig. 3.5. Termometru cu rezistor:
1 — rezistor; *2* — armătură de protecție; *3* — cleme; *4* — cap de racordare *5* — piuliță de fixare.

Fig. 3.6. Măsurarea temperaturii cu puntea Wheatstone neechilibrată:
1 — bloc de redresare și stabilizare a tensiunii; *2* — puntea cu rezistențe fixe R_1, R_2, R_3 și rezistența de măsurat R_θ; *3* — milivoltmetru magnetoelectric gradat în °C; *4* — rezistor de compensație.



c) Termometrele cu termocupluri funcționează pe baza efectului termoelectric. Termocuplul este format din doi termoelectrozi (din metale diferite) lipiți sau sudați într-un punct — punctul cald; cînd se încălzește punctul cald, la capetele libere ale termoelectrozilor — punctul rece — apare o tensiune termoelectromotoare, a cărei valoare depinde de natura metalelor și de diferența de temperatură dintre punctul cald și cel rece — tabela 3.7.

În utilizarea industrială termoelectrozii se introduc în armături identice cu cele ale termometrelor cu rezistoare. Tensiunea termoelectromotoare

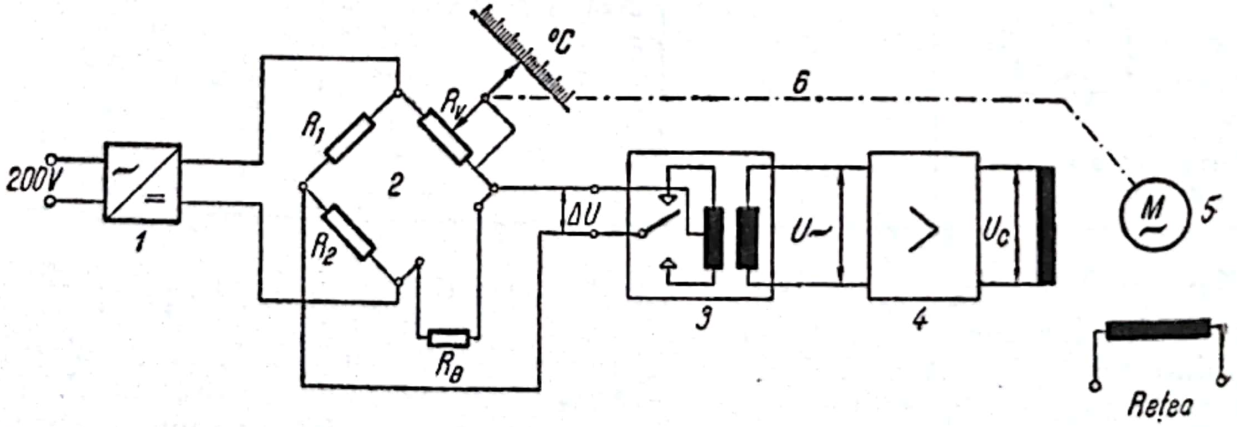


Fig. 3.7. Măsurarea temperaturii cu puntea autocompensată:
1 — bloc de redresare și stabilizare a tensiunii; *2* — puntea cu rezistențe fixe R_1 și R_2, rezistența variabilă R_v gradată în °C și rezistența de măsurat R_0; *3* — ondulor; *4* — amplificator; *5* — motor bifazat; *6* — transmisie mecanică.

Scanned with OKEN Scanner

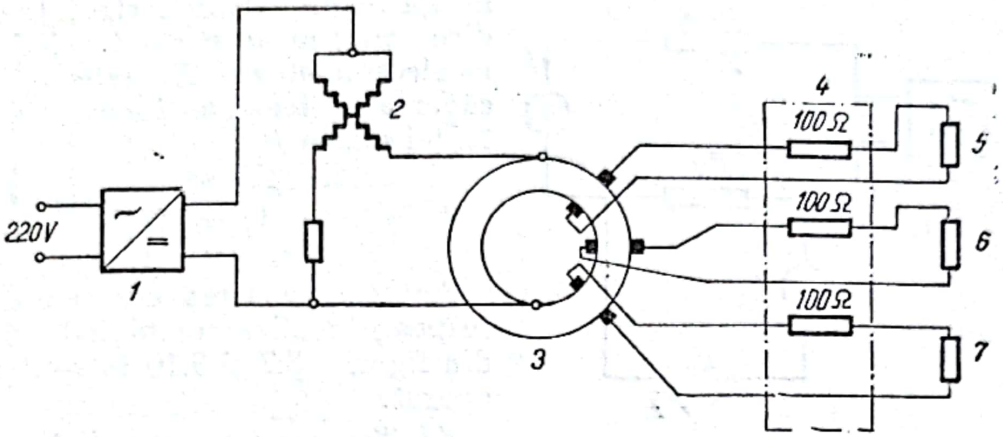


Fig. 3.8. Măsurarea temperaturii cu logometrul magnetoelectric:
1 — bloc de redresare și stabilizare a tensiunii; *2* — logometru cu bobine în T, gradat în °C; *3* — comutatorul punctelor de măsurare; *4* — blocul rezistoarelor de compensație; *5*, *6*, *7* — termometre cu rezistoare, amplasate în diferite punctele ale instalațiilor electrotermice.

se măsoară cu ajutorul milivoltmetrului magnetoelectric sau al compensatorului Lindeck-Rothe cu autocompensare.

Deoarece sistemul de măsurat din fig. 3.9 măsoară diferențe de temperatură, pentru ca milivoltmetrul să indice direct temperatura punctului în care se face măsurarea, este necesar un punct de comparație menținut la o temperatură cît mai constantă. Pentru aceasta termocuplul se prelungește prin conductoarele de compensație, din metale identice cu cele ale termoelectrozilor, la un punct cu temperatura constantă — termostatul încălzit electric, în general la 50°C. Compensarea variației temperaturii punctelor reci ale termocuplului la termometrele fără termostat se realizează cu ajutorul unui rezistor de compensație, montat în paralel cu termocuplul și aparatul de măsură, deoarece rezistența acestui rezistor variază în același sens cu temperatura mediului ambiant, variația tensiunii electromotoare este compensată.

Compensatorul Lindeck-Rothe (fig. 3.10) reprezintă un sistem de măsurare mai precis, deoarece curentul absorbit de el este practic nul. Curentul I, indicat de ampermetrul A se reglează cu rezistența R_v

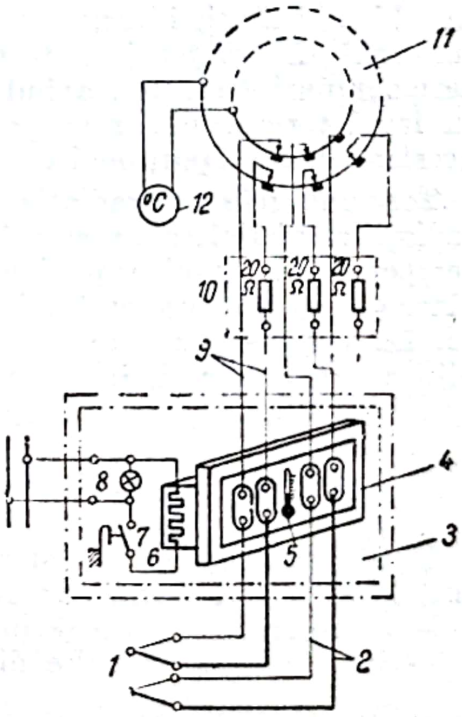


Fig. 3.9. Măsurarea temperaturii cu milivoltmetrul magnetoelectric:
1 — termocupluri; *2* — conductoare de compensație; *3* — termostat; *4* — placă de borne; *5* — termometru; *6* — rezistor de încălzire; *7* — regulator de temperatură cu bimetal; *8* — lampă de semnalizare; *9* — conductoare de cupru; *10* — blocul rezistoarelor de compensație; *11* — comutatorul punctelor de măsurare a temperaturii; *12* — milivoltmetru magnetoelectric gradat în °C.

Scanned with OKEN Scanner

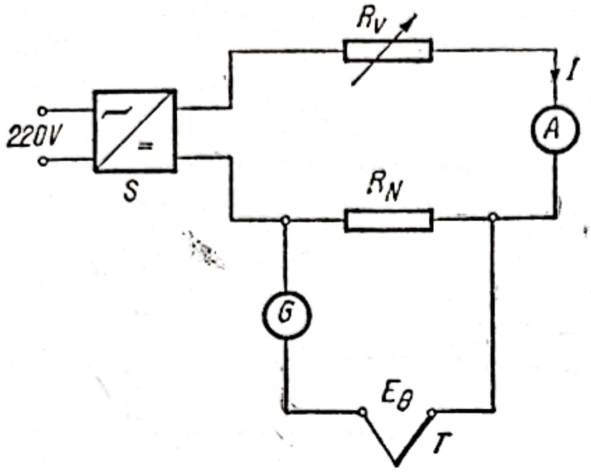


Fig. 3.10. Măsurarea temperaturii cu compensatorul Lindeck-Rothe:
S – bloc de redresare şi stabilizare a tensiunii; R_v – rezistenţă variabilă; R_N – rezistenţă etalon; A – ampermetru; G – galvanometru; T – termocuplu.

în aşa fel ca galvanometrul G să indice zero; în acest caz tensiunea termoelectromotoare E_θ este egală cu căderea de tensiune la bornele rezistenţei etalon R_N

$$E_\theta = I R_N. \qquad (3.24)$$

Autocompensarea compensatorului se poate realiza combinînd schemele din figurile 3.7 şi 3.10 într-un singur aparat.

d) Termometrele cu radiaţie măsoară temperatura unui obiect prin intermediul radiaţiei termice emise de acesta.

Termometrele cu radiaţie totală (tab. 3.7) transformă energia radiată de obiectul căruia i se măsoară temperatura şi captată de o plăcuţă metalică înnegrită, într-o tensiune termoelectromotoare, obţinută la bornele unor termocupluri înseriate, avînd punctul cald sudat de plăcuţa de captare; în locul termocuplelor se pot utiliza fotoelemente, curentul debitat de acestea fiind proporţional cu temperatura radiatorului.

Termometrele cu radiaţie parţială (tab. 3.7) măsoară numai energia radiaţiilor vizibile ale spectrului de emisie al obiectului căruia i se măsoară temperatura. Luminanţa imaginii obiectului radiant este comparată de către ochiul omenesc cu luminanţa filamentului unei lămpi cu incandescenţă. La aceleaşi luminanţe, ampermetrul gradat în °C, din circuitul de alimentare a lămpii, indică temperatura obiectului.

3.2. ÎNCĂLZIREA CU REZISTOARE

După procedeul de transformare a energiei electrice în energie termică, instalaţiile electrotermice cu rezistoare se împart în două categorii:
— cuptoare cu încălzire indirectă;
— instalaţii cu încălzire directă.

3.2.1. Cuptoare electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă

Acest tip de cuptoare se întîlneşte într-o mulţime de variante constructive, în cele ce urmează fiind prezentate variantele de bază.

a. **Cuptoarele electrice pentru tratamente termice.** Tratamentul termic cuprinde încălzirea pieselor (prefabricatelor) pînă la o anumită temperatură,

Scanned with OKEN Scanner

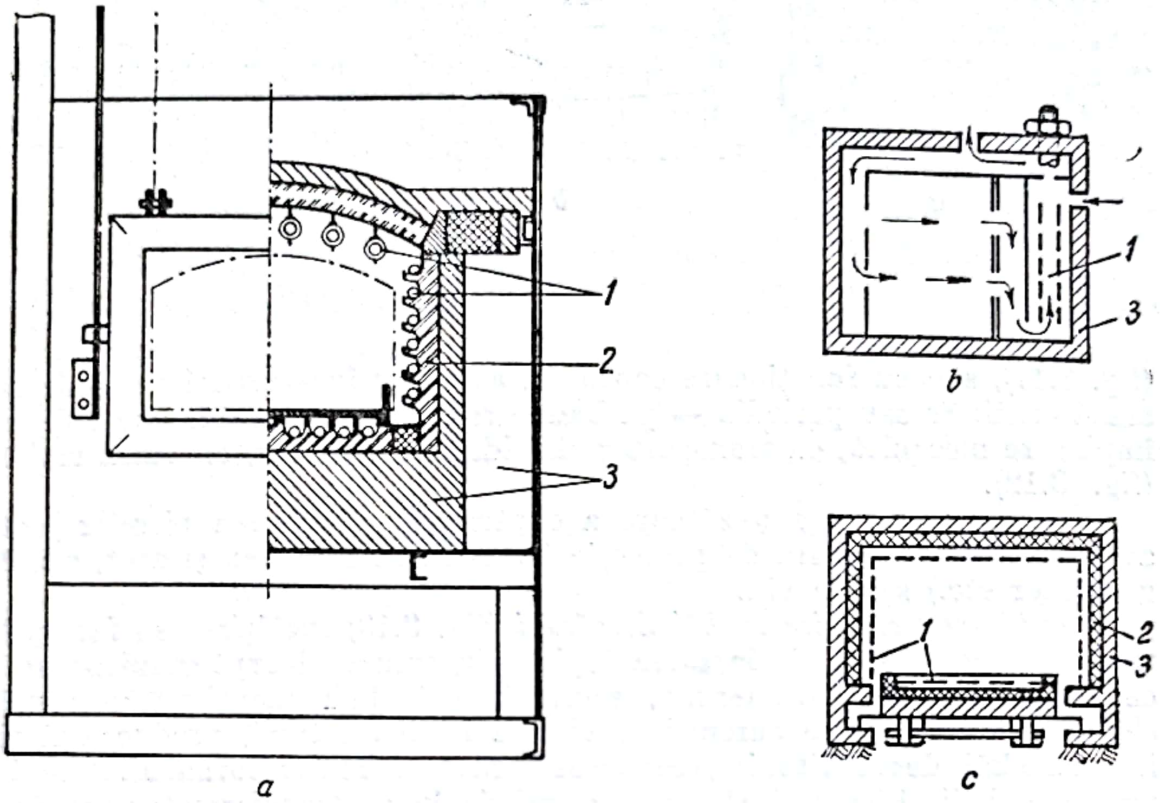


Fig. 3.11. Cuptoare electrice cu rezistoare cu funcţionare intermitentă:
a — cu cameră; *b* — cu cameră şi circulaţie forţată a aerului; *c* — cu cărucior. *1* — rezistoare; *2* — material refractar; *3* — material termoizolant.

menţinerea lor la această temperatură (egalizare) şi, eventual răcirea pînă la temperatura mediului ambiant. Aceste cuptoare se caracterizează prin temperatura maximă de lucru, regimul de funcţionare şi atmosfera de lucru.

La cuptoarele electrice cu temperatură joasă pînă la 600...700°C, transmiterea căldurii se realizează mai ales prin convecţie, circulaţia mediului gazos fiind naturală sau forţată.

Aceste cuptoare se întrebuinţează pentru uscarea pieselor sau a materialelor, pentru uscarea vopselelor sau a lacurilor de impregnare şi pentru tratamente termice (de exemplu, revenirea oţelului carbon, călirea duraluminiului etc.).

La cuptoarele electrice cu temperatură înaltă, peste 600—700°C, transmiterea căldurii se face mai ales prin radiaţie. Aceste cuptoare se utilizează la tratamentele termice ale metalelor (de exemplu: recoacerea, călirea, revenirea), la arderea pieselor ceramice şi la preîncălzirea metalelor ce urmează a fi laminate sau forjate.

Din punct de vedere al regimului de funcţionare, aceste cuptoare pot fi cu funcţionare intermitentă (cu cameră), adică cu încărcătură fixă — paralelipipedice sau cilindrice, cu ax orizontal sau vertical, cu cărucior

Scanned with OKEN Scanner

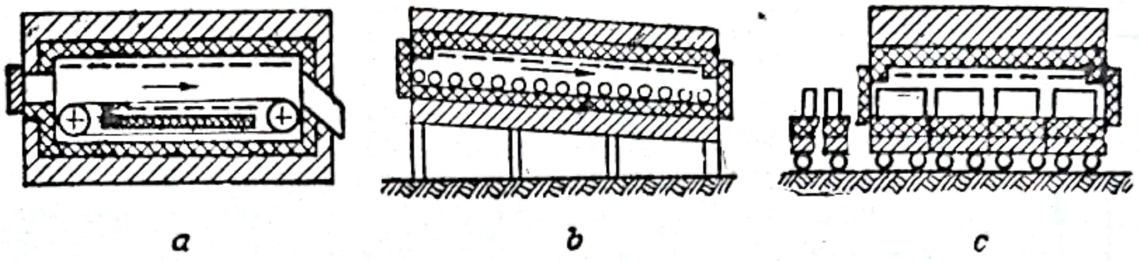


Fig. 3.12. Cuptoare electrice cu rezistoare cu funcţionare continuă:
a — cu bandă rulantă; *b* — cu role; *c* — cu cărucior.

(fig. 3.11), sau cu funcţionare continuă, adică cu încărcătură ce se deplasează continuu sau periodic — pe bandă rulantă, cu elevator, pe role, cu împingere mecanică, cu transportor elicoidal, cu cărucior, cu vatră mobilă (fig. 3.12).

Prin etanşarea corespunzătoare a cuptoarelor, încălzirea pieselor poate avea loc şi în atmosferă de protecţie (amestec de hidrogen şi azot, gaz de generator etc.) sau în vid.

În *cuptoarele electrice cu băi de săruri* (fig. 3.13) încălzirea se face prin transmiterea căldurii de la sarea topită din creuzetul cuptorului la piesele ce urmează a fi tratate termic, scufundate în baia menţionată. Forţele electrodinamice dintre curenţii ce circulă între electrozi, produc agitaţia intensă a băii de săruritopite, ceea ce asigură încălzirea uniformă a întregului volum al băii. Electrozii sînt alimentaţi de la un transformator prevăzut cu prize de reglaj a tensiunii secundare, în limitele 8... 25 V. Pentru topirea prealabilă a sărurilor se introduc în creuzet rezistoare de carbon, care se scot după ce sărurile s-au topit.

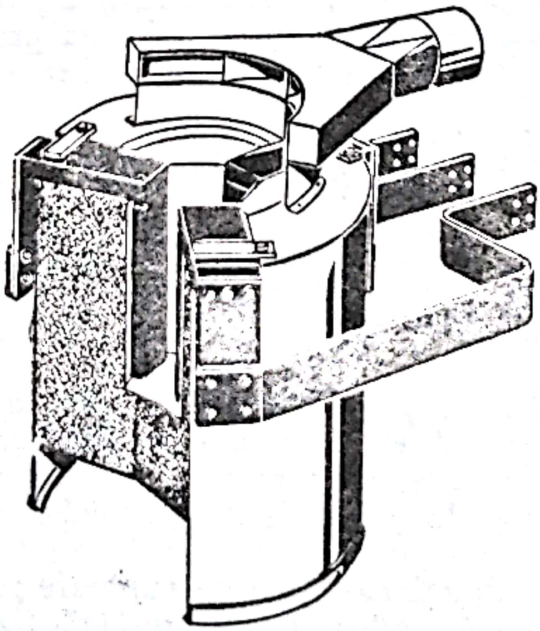
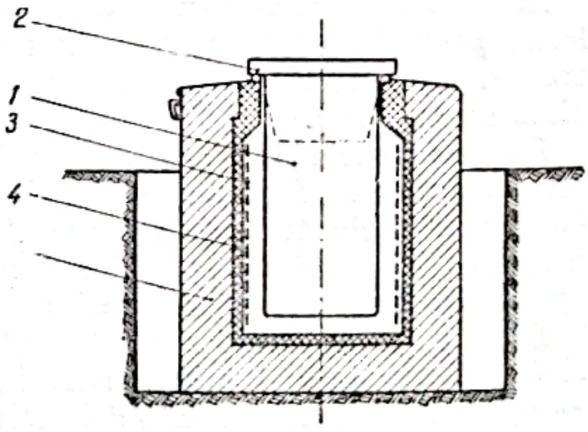


Fig. 3.13. Cuptor electric trifazat cu baie de săruri.

Fig. 3.14. Cuptor electric cu rezistoare pentru topire:
1 — creuzet; *2* — capac; *3* — rezistoare; *4* — material refractar; *5* — material termoizolant.



Scanned with OKEN Scanner

b. **Cuptoare electrice pentru topirea metalelor.** Cuptoarele electrice cu rezistoare sînt întrebuinţate pentru topirea metalelor uşor fuzibile; plumb, zinc, aluminiu, magneziu etc. Metalul se introduce într-un creuzet din material refractar cu rezistenţă mecanică mare, încălzirea realizîndu-se cu rezistoare montate în jurul creuzetului — figura 3.14.

c. **Cuptoarele electrice de laborator** sînt de mică capacitate şi putere redusă permiţînd obţinerea unei game largi de temperaturi. Din punct de vedere constructiv se deosebesc cuptoarele electrice cu cameră — asemănătoare celor industriale, tubulare sau cu creuzet.

În cuptorul tubular încălzirea are loc într-un tub de porţelan sau alt material refractar, rezistorul sub formă de sîrmă fiind înfăşurat în exteriorul tubului.

Creuzetul cuptorului de laborator (Tamman) se execută din carbon, acesta avînd totodată şi rolul de rezistor.

3.2.2. Elemente încălzitoare (rezistoare)

Materialele folosite pentru elementele încălzitoare trebuie să posede următoarele proprietăţi:

— stabilitate chimică şi rezistenţă mecanică la temperaturi înalte;

— rezistivitate electrică mare, pentru a se reduce cantitatea de material necesar;

— coeficient de variaţie a rezistivităţii cu temperatura redus, pentru ca diferenţa dintre rezistenţa electrică la rece şi cea la cald să fie cît mai mică, rezultînd astfel o variaţie neimportantă a puterii absorbite de cuptor de la reţea în timpul funcţionării;

— rezistenţă electrică constantă în timp, deoarece prin îmbătrînirea materialului rezistenţa creşte, ceea ce conduce la scăderea puterii cuptorului;

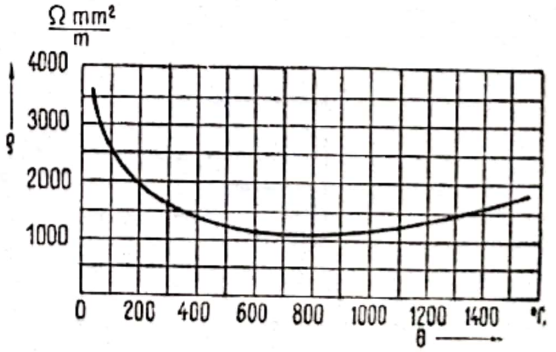
— coeficient de dilatare mic, pentru a evita dificultăţi constructive;

— să fie uşor prelucrabile adică să permită trefilarea, laminarea şi sudarea.

Principalele materiale care îndeplinesc aceste condiţii sînt date în tabela 3.8.

Materialele utilizate pînă la temperaturi de circa 1 200 °C sînt aliaje pe bază de crom-nichel şi crom-aluminiu; aliajul de crom-nichel are proprietăţi mecanice mai bune decît aliajul crom-aluminiu, însă costul său este mult mai ridicat.

La temperaturi înalte se folosesc silita (carborund — SiC), grafitul şi carbonul, materiale care prezintă însă o variaţie pronunţată a rezistivităţii cu temperatura (fig. 3.15); din



ig. 3.15. Variaţia rezistivităţii silitei cu temperatura.

Tabela 3.8

Proprietățile materialelor folosite pentru elementele încălzitoare [28]

Denumirea materialului	Forma	Temperatura maximă admisibilă de lucru °C	Densitatea kg/dm³	Rezistivitatea Ω mm²/m	Coeficientul de variație al rezistivității cu temperatura 1/°C · 10⁻³	Conectare la rețea
Oțel (Fe)	Sîrmă, bandă	500	7,86	0,12...0,15	7...10	Directă sau prin transformator
Cromnichel (Cr 15, Ni 60, Fe 25)		1000	8,3	1,1	0,1	
Cromnichel (Cr20, Ni80)		1200	8,4	1,1	0,035	
Kantal (Cr20, Al5, Fe 75)		1300	7,1...7,25	1,3...1,45	0,06...0,09	
Silită	bară, țeavă	1400	2,3	800...1900	Variabil	Prin autotrafo sau trafo cu tensiune variabilă
Grafit	bară, țeavă,	2000	1,6	8...13		
Carbon	placă, creuzet	2000	1,6	40...60		

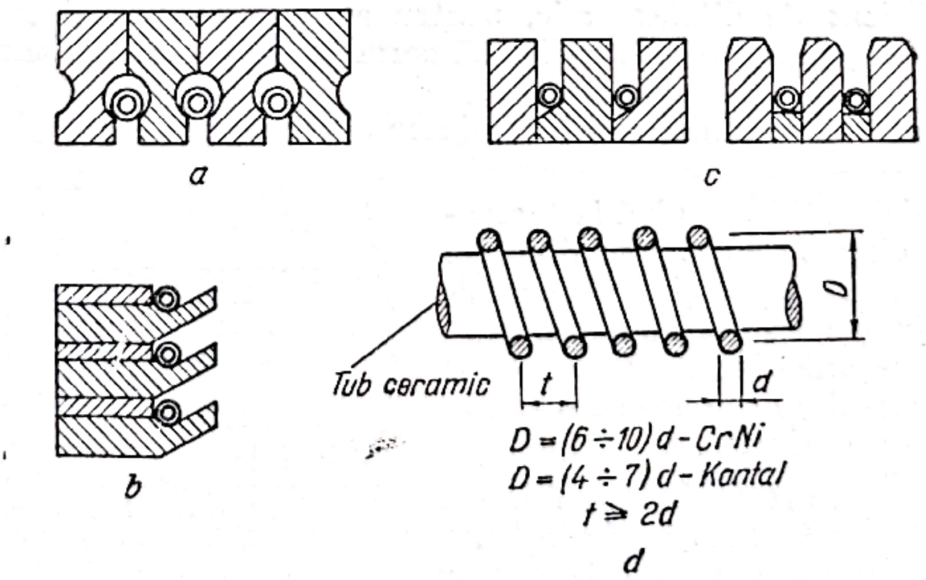


Fig. 3.16. Modurile de fixare a rezistoarelor din sîrmă spiralată:
a — pe boltă; *b* — pe pereții laterali; *c* — sub vatră; *d* — dimensiunile spiralei pentru sîrmă cu diametrul $d = 3 \ldots 8$ mm.

Scanned with OKEN Scanner

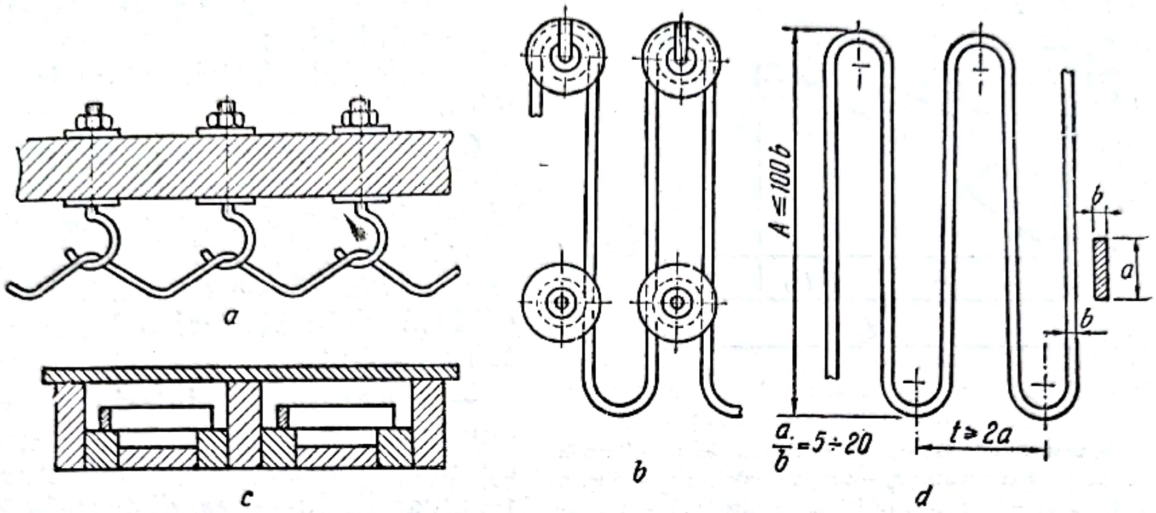


Fig. 3.17. Modurile de fixare a rezistoarelor din bandă în zig-zag:
a — suspendate cu cîrlige pe boltă; *b* — pe pereții laterali, montate cu cîrlige; *c* — sub vatră; *d* — dimensiunile buclei din bandă.

această cauză alimentarea elementelor încălzitoare confecționate din aceste materiale se face printr-un transformator cu tensiune reglabilă. În plus grafitul și carbonul se oxidează foarte ușor în aer și de aceea funcționarea lor este posibilă numai în vid sau atmosferă protectoare.

În construcția cuptoarelor de laborator se întîlnesc și alte materiale decît cele menționate și anume: platina (pînă la 1 400 °C), molibdenul (pînă la 2 000 °C), tantalul (pînă la 2 500 °C) și wolframul (pînă la 2 800 °C).

Construcția și modul de fixare a elementelor încălzitoare. Din punct de vedere constructiv elementele încălzitoare cele mai răspîndite sînt următoarele: *sîrmă* spiralată pe un tub ceramic; *bandă* în zig-zag; *bară* sau *țeavă* fixată direct în căptușeala cuptorului; *tubulare*, din sîrmă spiralată introdusă într-un tub de protecție din oțel refractar, spațiul dintre sîrmă și tub fiind umplut cu un material izolant din punct de vedere electric și conductor din punct de vedere termic (de exemplu oxid de magneziu).

Modurile de fixare și principalele relații între dimensiuni sînt indicate în figurile 3.16 și 3.17.

3.2.3. Calculul cuptoarelor electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă

La calculul cuptoarelor electrice se precizează următoarele date: — materialul ce urmează a fi încălzit, forma încărcăturii, regimul tehnologic necesar (temperatura de încălzire, timpul de încălzire etc.), condiții tehnologice speciale (de exemplu atmosferă de protecție), productivitatea cuptorului.

Proiectarea constă în:

— alegerea tipului și a numărului necesar de cuptoare pe baza unui calcul tehnico-economic [2];

Scanned with OKEN Scanner

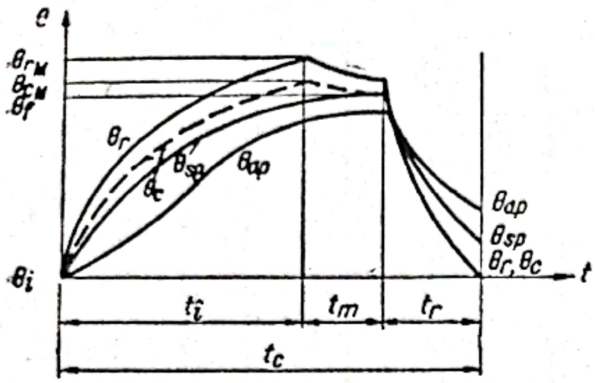


Fig. 3.18. Regimul termic al cuptorului cu funcţionare intermitentă:
t_i — timpul de încălzire; t_m — timpul de menţinere la temperatură constantă; t_r — timpul de răcire; t_c — durata ciclului. θ_i — temperatura iniţială a piesei; θ_f — temperatura maximă finală a piesei; θ_{rM} — temperatura maximă a rezistoarelor; θ_{cM} — temperatura maximă a cuptorului.

— calculul termic şi construcţia cuptorului ales;

— calculul electric al rezistoarelor.

Calculul termic al cuptorului electric cu rezistoare. Determinarea dimensiunilor şi alegerea materialelor de construcţie ale cuptorului se face urmărindu-se ca pierderile de căldură să fie cît mai reduse. Pentru aceasta:

— dimensiunile interioare ale cuptorului nu trebuie să depăşească cu mult dimensiunile încărcăturii, recomandîndu-se ca distanţele între încărcătură şi căptuşeală să fie de circa 25 mm, iar între încărcătură şi rezistoare de circa 50 mm;

— grosimile uzuale ale materialului refractar sînt de 6...12 cm, iar ale materialului termoizolant de 12...20 cm.

Dimensiunile şi materialele alese se vor modifica în decursul calculului, pentru ca soluţia definitivă să îndeplinească toate cerinţele procesului tehnologic impus.

Scopul calculului termic este de a determina consumul de căldură şi puterea cuptorului, necesare pentru realizarea regimului tehnologic impus, regim descris de curba de temperatură a pieselor sau a materialelor introduse în cuptor. În figurile 3.18 şi 3.19 sînt arătate curbele de temperatură, adică variaţia în timp a temperaturii la suprafaţa piesei θ_{sp} şi a temperaturii în axul piesei θ_{ap}, pentru un ciclu termic complet, cuprinzînd încălzirea, menţinerea la temperatura constantă şi răcirea piesei în cuptor.

Regimul termic al cuptorului cu funcţionare intermitentă (fig. 3.18) este descris de variaţia în timp a temperaturii cuptorului θ_c, şi a rezistoarelor θ_r.

Consumul de căldură pentru cuptorul cu funcţionare intermitentă, în timpul unui ciclu, este

$$Q_c = Q_u + Q_a + Q_p \qquad [J], \tag{3.26}$$

unde:

Q_u este cantitatea de căldură utilă pentru încălzirea pieselor la temperatura θ_f, determinată cu relaţia (3.4);

Q_a — cantitatea de căldură pentru încălzirea pieselor auxiliare (coşuri, etajere etc.) — relaţia (3.4);

Q_p — căldura pierdută în timpul unui ciclu

$$Q_p = k_i(\Phi_i \cdot t_i + \Phi_m \cdot t_m + \Phi_r \cdot t_r + Q_r) \quad [J]; \tag{3.27}$$

Scanned with OKEN Scanner

k_t — coeficient care ține cont de pierderile termice prin neetanșeitățile și elementele constructive ale cuptorului care reprezintă scurtcircuite termice;

Φ_t, Φ_m, Φ_r — fluxul termic transmis prin pereții cuptorului în perioada t_t de încălzire, t_m de menținere la temperatură constantă și respectiv t_r de răcire (§ 3.1.3), în W;

Q_r — căldura pierdută prin radiația ce are loc prin ușile deschise și fantele cuptorului, în timpul t_{td} necesar încărcării și descărcării cuptorului, obținută prin modificarea relației (3.11):

$$Q_r = \varepsilon_r C_n \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] A \Psi t_{td} \quad [\text{J}], \tag{3.28}$$

în care:

A este suprafața ușii cuptorului;

Ψ — coeficient de diafragmare dat în tabela 3.9 în funcție de raportul D/a, D fiind dimensiunea deschizăturii iar a — grosimea peretelui;

T_1, T_2 — temperatura cuptorului, respectiv a mediului ambiant, în °K.

Randamentul termic este:

$$\eta_t = \frac{Q_u}{Q_c} \cdot 100 \quad [\%]. \tag{3.29}$$

Puterea cuptorului cu funcționare intermitentă

$$P = \frac{Q_t}{t_t} \quad [\text{W}], \tag{3.30}$$

se determină pe baza consumului de căldură în perioada de încălzire

$$Q_t = Q_u + Q_a + k_t (\Phi_t \cdot t_t + \Phi_r \cdot t_r + Q_r) = Q_c - k_t \Phi_m \cdot t_m \quad [\text{J}], \tag{3.31}$$

deoarece în această perioadă cuptorul are nevoie de cantitatea maximă de căldură.

Timpul de încălzire este în general prescris de procesul tehnologic și prezintă o deosebită importanță. Astfel, la o valoare redusă a acestui timp, diferența de temperatură dintre straturile de la suprafață și cele din axul piesei este mare, ceea ce conduce la solicitări interne importante; pe de altă parte productivitatea cuptorului este mărită, pierderile sînt micșorate și randamentul este îmbunătățit. Determinarea timpului de încălzire se face prin metodele de calcul indicate în lucrările [48] și [54]; în general se recurge la rezultate experimentale.

Tabela 3.9

Coeficientul de diafragmare Ψ [48]

$\frac{D}{a}$	Rotund ($D = Ø$)	Pătrat ($D = l$)*	Dreptunghiular $L/l = 2/1$ ($D = L$)**
0,5	0,3	0,35	0,44
1	0,48	0,52	0,58
2	0,66	0,7	0,75
3	0,74	0,77	0,82
4	0,79	0,81	0,86
5	0,82	0,85	0,88
6	0,85	0,87	0,90

* l este latura pătratului;

** L, l sînt latura mare, respectiv mică a dreptunghiului.

Scanned with OKEN Scanner

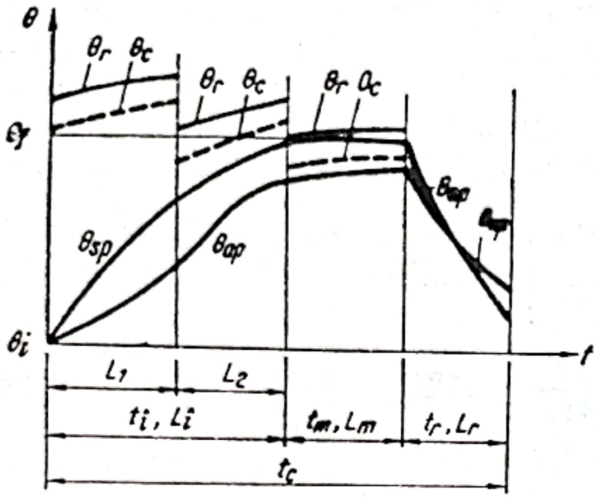


Fig. 3.19. Regimul termic al cuptorului cu funcţionare continuă.

Puterea instalată a cuptorului este:

$$P_i = kP \quad [\mathrm{W}], \qquad (3.32)$$

în care coeficientul de siguranţă $k = 1{,}1 \ldots 1{,}5$ ţine seama de posibilitatea forţării regimului de încălzire a cuptorului aflat în stare rece, de slăbirea în timp a izolaţiei termice, de posibilitatea scăderii tensiunii reţelei faţă de valoarea nominală şi de îmbătrînirea elementelor încălzitoare.

Regimul termic al cuptorului cu funcţionare continuă este indicat în figura 3.19, cuptorul fiind împărţit în zone termice corespunzătoare curbei de temperatură a pieselor: de exemplu, două zone pentru încălzire şi cîte una pentru menţinere la temperatură constantă, respectiv pentru răcire. Puterea fiecărei zone se calculează pe baza relaţiilor utilizate la cuptorul cu funcţionare intermitentă, determinînd consumul de căldură pentru încălzirea pieselor şi acoperirea pierderilor termice pe porţiunea zonei respective. Puterea cuptorului reprezintă suma puterilor tuturor zonelor cuptorului.

Lungimea zonei de încălzire este

$$L_i = \frac{m_p \cdot t_i}{M_s} \quad [\mathrm{m}], \qquad (3.33)$$

a zonei de menţinere la temperatură constantă

$$L_m = \frac{m_p \cdot t_m}{M_s} \quad [\mathrm{m}], \qquad (3.34)$$

şi a zonei de răcire

$$L_r = \frac{m_p \cdot t_r}{M_s} \quad [\mathrm{m}]. \qquad (3.35)$$

În aceste relaţii m_p este productivitatea cuptorului, în kg/h, iar M_s — încărcarea specifică de piese pe unitate de lungime a cuptorului, în kg/m.

Exemplu. Să se determine puterea instalată a unui cuptor electric cu rezistoare, cu funcţionare intermitentă (tab. 3.6) destinat tratamentului termic al unor lingouri de oţel, avînd dimensiunile 0,2 × 0,15 × 0,5 m, în cuptor încălzindu-se simultan două asemenea lingouri. Regimul tehnologic necesar (fig. 3.18): $\theta_i = 20\,^\circ\mathrm{C}$; $\theta_f = 1\,000\,^\circ\mathrm{C}$; $\theta_{cM} \simeq \theta_f$; $t_i = 1{,}5\ h = 5\,400$ s; $t_m = 0{,}25\ h = 900$ s; timpul de încărcare-descărcare $t_{id} = 0{,}05$ h = 180 s; răcirea nu se face în cuptor. Calculele sînt expuse în tabela 3.10.

Tabela 3.10

Exemplu de calcul al puterii instalate a unui cuptor electric cu rezistoare

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Masa pieselor	$m = \rho' \cdot v$	$m = 2 \cdot 7860\ (0{,}2 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}5)$	235,8 kg
Energia specifică	fig. 3.2	$i = 0{,}21$	0,21 kWh/kg
Căldura utilă	(3.4)	$Q_u = 235{,}8 \cdot 0{,}21 \cdot 3600 \cdot 10^3$	$180 \cdot 10^6$ J
Puterea utilă	(3.6)	$P_u = \frac{180 \cdot 10^6}{5400}$	$33{,}3 \cdot 10^3$ W
Suprafața ușii cuptorului	Constructiv	$A = 0{,}45 \cdot 0{,}22$	0,1 m²
Căldura pierdută prin radiație	(3.28) $\Psi = 0{,}58$	$Q_R = 0{,}8 \cdot 5{,}67 \left[\left(\frac{1323}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4\right] \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}58 \cdot 180$	$1{,}33 \cdot 10^6$ J
Căldura pierdută în timpul unui ciclu	(3.27); $k_t = 1{,}2$; (tab. 3.6); $\Phi_m = \Phi_t$.	$Q_p = 1{,}2(6010 \cdot 5400 + 6010 \cdot 900 + 1{,}33 \cdot 10^6)$	$39{,}19 \cdot 10^6$ J.
Consumul de căldură al cuptorului în timpul unui ciclu.	(3.26); $Q_a \simeq 0$	$Q_c = 180 \cdot 10^6 + 39{,}19 \cdot 10^6$	$219{,}19 \cdot 10^6$ J
Randamentul termic	(3.29)	$\eta_t = \frac{180 \cdot 10^6}{219{,}19 \cdot 19^6} \cdot 100$	82,1%
Consumul de căldură în perioada de încălzire	(3.31)	$Q_i = 219{,}19 \cdot 10^6 - 1{,}2 \cdot 6010 \cdot 900$	$212{,}7 \cdot 10^6$ J
Puterea cuptorului	(3.30)	$P = \frac{212{,}7 \cdot 10^6}{5400}$	$39{,}4 \cdot 10^3$ W
Puterea instalată	(3.32); $k = 1{,}15$	$P_i = 1{,}15 \cdot 39{,}4 \cdot 10^3$	$45 \cdot 10^3$ W

Calculul electric al cuptorului cu rezistoare. Calculul electric al cuptorului cu rezistoare constă în: — alegerea materialului rezistoarelor; — stabilirea schemei de conexiuni; — determinarea dimensiunilor rezistoarelor; — amplasarea rezistoarelor în interiorul cuptorului; — determinarea randamentului și a consumului specific de energie al cuptorului.

Datele necesare pentru calcul sînt: puterea instalată a cuptorului P_i (rel. 3.32), tensiunea de alimentare U și temperatura maximă de lucru a cuptorului θ_{CM} (fig. 3.18) sau a zonei termice respective (fig. 3.19).

Scanned with OKEN Scanner

Materialul rezistoarelor se alege astfel încît temperatura sa maximă de lucru (tab. 3.8) să depăşească cu circa 2...10% temperatura maximă a cuptorului.

Rezistoarele cuptorului pot fi conectate în scheme trifazate (stea, triunghi) sau monofazate, tensiunea maximă de alimentare fiind 500 V, din motive de protecţie a personalului împotriva electrocutării.

Puterea specifică a rezistoarelor. Durata de funcţionare a rezistoarelor este determinată de puterea lor specifică P_s, adică de fluxul termic pe care-l pot emite în condiţiile date din cuptor:

$$P_s = \frac{P}{A} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right], \tag{3.36}$$

în care: P este puterea rezistorului, în W;
A — suprafaţa laterală a rezistorului, în m².

Puterea specifică a rezistoarelor depinde în primul rînd de temperatura de lucru a cuptorului.

1) *Puterea specifică a rezistoarelor din cuptoarele cu temperatură înaltă* (peste 700°C). În aceste cuptoare transmiterea căldurii are loc în principal prin radiaţie.

Dacă se consideră un cuptor electric ideal, în care nu există pierderi prin căptuşeală ($Q_p = 0$) iar rezistorul este executat sub forma unei table subţiri care înconjoară încărcătura (fig. 3.20), ecuaţia schimbului de căldură prin radiaţie este, conform relaţiei (3.14),

$$P = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] A \quad [\mathrm{W}], \tag{3.37}$$

de unde rezultă temperatura rezistorului

$$T_1 = 100\sqrt[4]{\frac{P}{C_{12}A} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4} \quad [^\circ\mathrm{K}] \tag{3.38}$$

şi *puterea specifică a rezistorului ideal*

$$P_{sid} = \frac{P}{A} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right], \tag{3.39}$$

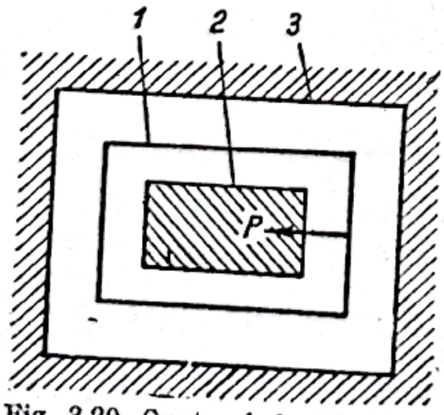


Fig. 3.20. Cuptorul electric ideal: *1* — rezistor; *2* — încărcătură; *3* — căptuşeală.

în care: P este puterea rezistorului, în W;
A — suprafaţa laterală a rezistorului, în m²;
T_1, T_2 — temperaturile rezistorului şi piesei, în °K;
C_{12} — coeficientul redus de radiaţie, în W/m²°K⁴ (rel. 3.15).

Notînd puterea specifică ideală, în cazul în care atît rezistorul cît şi încărcătura sînt corpuri absolut negre ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$), cu

$$P^*_{sid} = C_n\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \tag{3.40}$$

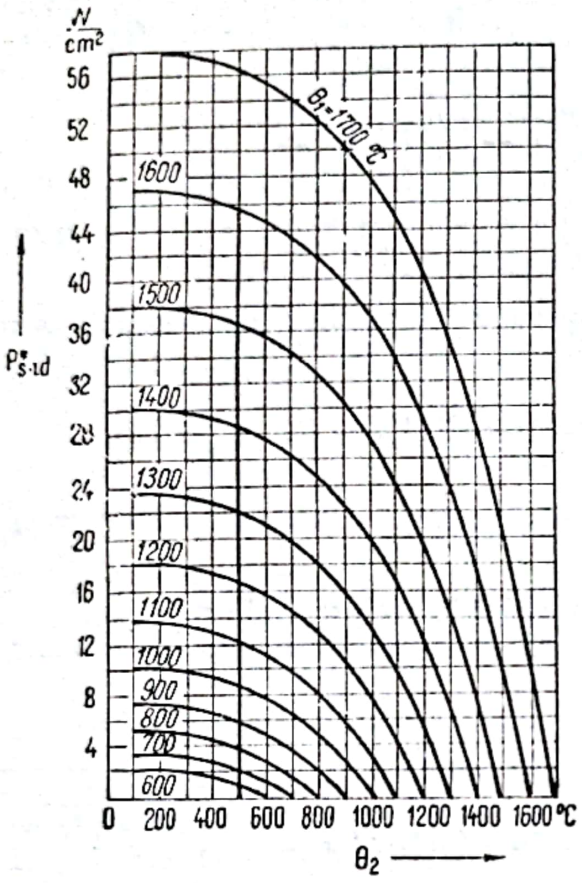


Fig. 3.21. Curbele puterii specifice ale rezistorului ideal absolut negru:
θ_1 — temperatura rezistorului; θ_2 — temperatura încărcăturii.

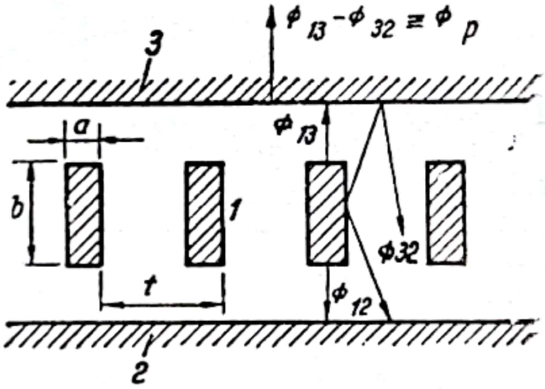


Fig. 3.22. Schimbul de căldură prin radiație în cuptorul electric cu rezistoare reale:
1 — rezistor; *2* — piesă; *3* — căptușeală.

relația (3.39) poate fi pusă sub forma:

$$P_{s\,id} = \varepsilon_{12} P^*_{s\,id}\,. \tag{3.41}$$

În figura 3.21 sînt trasate curbele puterii specifice ale rezistorului ideal absolut negru, pentru diferite temperaturi θ_1 ale rezistorului și θ_2 ale încărcăturii.

Schimbul de căldură prin radiație în cuptorul electric cu rezistoare reale (fig. 3.22) este mult mai complicat și poate fi exprimat cantitativ prin cele trei ecuații ale bilanțului termic, cu condiția ca zidăria cuptorului să se afle în regim staționar (Φ_p = constant):

— puterea totală degajată de rezistoare se transmite prin radiație piesei și suprafeței interioare a pereților

$$P_1 = \Phi_{12} + \Phi_{13} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] A_{12} + C_{13}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4\right] A_{13} \quad [\mathrm{W}]; \tag{3.42}$$

— puterea absorbită de piesă este egală cu suma fluxului termic radiat direct de rezistor şi a fluxului termic provenit direct de la suprafaţa interioară a pereţilor cuptorului

$$P_2 = \Phi_{12} + \Phi_{32} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]A_{12} + \\ + C_{32}\left[\left(\frac{T_3}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]A_{32} \qquad [\mathrm{W}]; \tag{3.43}$$

— puterea consumată pentru acoperirea pierderilor de căldură prin pereţii cuptorului

$$P_3 = \Phi_{13} - \Phi_{32} = C_{13}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3}{100}\right)^4\right]A_{13} - C_{32}\left[\left(\frac{T_3}{100}\right)^4 - \\ - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]A_{32} \qquad [\mathrm{W}]. \tag{3.44}$$

În aceste ecuaţii A_{12}, A_{13}, A_{32} sînt suprafeţele reciproce de radiaţie.

Prin rezolvarea sistemului de ecuaţii se obţine temperatura rezistorului

$$T_1 = 100\sqrt[4]{\frac{P_1\left[\left(1 - \frac{P_3}{P_1}\right)C_{13}A_{13} + C_{32}A_{32}\right]}{C_{12}A_{12}\cdot C_{13}A_{13} + C_{13}A_{13}\cdot C_{32}A_{32} + C_{12}A_{12}\cdot C_{32}A_{32}} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4} \quad [^\circ\mathrm{K}]. \tag{3.45}$$

Înmulţind numărătorul şi numitorul expresiei de sub radical cu C_{12}, obţinem

$$T_1 = 100\sqrt[4]{\frac{P_1}{C_{12}A_{ef}} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4} \quad [^\circ\mathrm{K}], \tag{3.46}$$

în care mărimea

$$A_{ef} = \frac{C_{12}A_{12}\cdot C_{13}A_{13} + C_{13}A_{13}\cdot C_{13}A_{32} + C_{12}A_{12}\cdot C_{32}A_{32}}{\left[\left(1 - \frac{P_3}{P_1}\right)C_{13}A_{13} + C_{23}A_{32}\right]C_{12}} \tag{3.47}$$

reprezintă suprafaţa efectivă a rezistorului, numeric egală cu suprafaţa rezistorului ideal, avînd aceeaşi putere şi lucrînd în aceleaşi condiţii de temperatură.

Suprafaţa efectivă poate fi exprimată în funcţie de suprafaţa reală A_1 a rezistorului, $A_{ef} = A_1 \cdot \alpha_{ef}$, în care α_{ef} este coeficientul de eficienţă a radiaţiei rezistorului depinzînd de coeficienţii reduşi de radiaţie C_{12}, C_{13}, C_{32}, de suprafeţele reciproce A_{12}, A_{13}, A_{32} şi de mărimea relativă a pierderilor de căldură P_3/P_1.

Scanned with OKEN Scanner

Puterea specifică a rezistorului real rezultă din relaţia (3.46)

$$P_s = \frac{P_1}{A_1} = C_{12}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\alpha_{ef} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]; \tag{3.48}$$

utilizînd relaţiile (3.39) şi (3.41) se obţine

$$P_s = \alpha_{ef},\ P_{sid} = \alpha_{ef}\varepsilon_{12}P^*_{sid}. \tag{3.49}$$

În tabela 3.11 sînt date valorile lui α_{ef} şi ε_{12} pentru încălzirea unor metale cu diferite tipuri constructive de rezistoare.

Tabela 3.11

Valorile coeficientului α_{ef}, recomandate pentru încălzirea diferitelor materiale ($P_3/P_1 = 0{,}25$), [2].

Tipul rezistorului	*Materialul pieselor încălzite*			
	Oţel $\varepsilon_{12} = 0{,}8$	Cupru $\varepsilon_{12} = 0{,}7$	Oţel în atmosferă protectoare $\varepsilon_{12} = 0{,}45$	Aluminiu $\varepsilon_{12} = 0{,}3$
Bandă în zigzag liberă	0,46	0,47	0,51	0,54
Bandă plată turnată	0,72	0,72	0,75	0,78
Bandă în zigzag aşezată în crestătură	0,44	0,45	0,48	0,5
Bandă în zigzag pe suporţi	0,41	0,42	0,47	0,5
Sîrmă în zigzag; bară	0,6	0,62	0,65	0,68
Spirală de sîrmă simplă pe tuburi	0,46	0,47	0,49	0,5
Spirală de sîrmă aşezată în crestături	0,31	0,32	0,34	0,35
Spirală de sîrmă pe suporţi	0,39	0,4	0,44	0,47

Folosind curbele puterii specifice pentru rezistorul ideal absolut negru din figura 3.21 şi valorile lui α_{ef} şi ε_{12} din tabela 3.11, cu ajutorul relaţiei (3.49) se poate determina mărimea puterii specifice a rezistorului real. Date referitoare la puterea specifică a diferitelor cazuri întîlnite în practică se găsesc în lucrarea [60]; ca valori orientative se indică 0,7...2 W/cm² pentru rezistoarele Cr—Ni şi Kantal la temperatura de 800...1 200°C, şi 6...7 W/cm² pentru rezistoarele aparatelor electrocasnice.

2). *Puterea specifică a rezistoarelor din cuptoarele cu temperatură joasă* (sub 700°C). În aceste cuptoare transmiterea căldurii are loc în principal prin convecţie; utilizînd relaţia (3.10) rezultă pentru puterea specifică expresia

$$P_s = \frac{P}{A} = \alpha_c(\theta_1 - \theta_2) \quad \left[\frac{W}{m^2}\right], \tag{3.50}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care: P este puterea rezistorului, în W;
A — suprafaţa laterală a rezistorului, în m²;
α_c — coeficientul de transmitere a căldurii prin convecţie în W/m² grd;
θ_1 — temperatura rezistorului;
θ_2 — temperatura maximă a fluidului care spală rezistorul.

Valorile coeficientului de convecţie α_c, depind de dimensiunile şi construcţia rezistoarelor, de natura, viteza şi temperatura fluidului care formează atmosfera cuptorului şi de temperatura cuptorului; aceste valori sînt date sub formă de nomograme în lucrarea [48].

Dimensionarea rezistoarelor. Rezistoarele trebuie să fie astfel dimensionate încît să asigure consumul de căldură al cuptorului la o durată cît mai mare de funcţionare a rezistoarelor. Cele două condiţii sînt exprimate de relaţiile

$$P_f = \frac{U_f^2}{R} = \frac{U_f^2}{\rho \frac{l}{s}} \quad [\mathrm{W}] \tag{3.51}$$

şi

$$P_{sa} = \frac{P_f}{A} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right], \tag{3.52}$$

în care: P_f — este puterea rezistoarelor pe o fază, în W;
U_f — tensiunea aplicată rezistoarelor, în V;
R — rezistenţa pe o fază a rezistoarelor, în Ω;
ρ — rezistivitatea materialului rezistorului la temperatura de lucru, în Ω mm²/m;
l — lungimea pe o fază a rezistorului, în m;
s — secţiunea rezistorului, în mm²;
P_{sa} — puterea specifică admisibilă a rezistorului, în W/m²;
A — suprafaţa laterală a rezistorului, în m².

Pentru rezistoare din sîrmă cu diametrul d, rezolvarea ecuaţiilor (3.51) şi (3.52) dă:

— diametrul $d = 10\sqrt[3]{\frac{4\rho P_f^2}{\pi^2 U_f^2 P_{sa}}}$ [mm]; (3.53)

— lungimea $l = 10^2\sqrt[3]{\frac{P_f U_f^2}{4\pi\rho P_{sa}^2}}$ [m]. (3.54)

Scanned with OKEN Scanner

Pentru rezistoare din bandă, notînd $m = a/b$ (fig. 3.17d) obţinem dimensiunile benzii

$$b = 10\sqrt{\frac{\rho P_f^2}{2m(m+1)U_f^2 P_{sa}}} \quad [\text{mm}], \tag{3.55}$$

$$a = mb \qquad [\text{mm}] \tag{3.56}$$

şi lungimea

$$l = 10^2\sqrt[3]{\frac{mP_f U_f^2}{4(m+1)^2\rho P_{sa}}} \quad [\text{m}]. \tag{3.57}$$

Amplasarea rezistoarelor în cuptor se face astfel încît să se asigure cea mai bună transmitere a căldurii la materialul de încălzit; de exemplu în cazul pieselor aşezate vertical, rezistoarele se vor plasa pe pereţii laterali, iar în cazul pieselor plate, se vor plasa pe boltă şi sub vatră.

Determinarea randamentului şi a consumului specific de energie se face cu indicaţiile din § 3.1.2, ţinînd cont şi de puterile necesare motoarelor de acţionare a ventilatoarelor, a mecanismelor de transport etc.

Exemplu. Să se dimensioneze rezistoarele pentru cuptorul electric calculat în tabelele 3.6 şi 3.10. Rezistoarele sînt executate din sîrmă de cromnichel Cr20Ni80, montată pe tuburi ceramice; conexiunea lor este trifazată în triunghi ($U_f = 380$ V, $P_f = 45/3 \times 10^3 = 15 \cdot 10^3$ W). Calculul este cuprins în tabela 3.12.

3.2.4. Echipamentul electric al cuptoarelor cu rezistoare

Cuptoarele electrice cu rezistoare sînt alimentate printr-un transformator sau autotransformator, mono- sau trifazat, din reţelele electrice de joasă tensiune (în cazul în care puterea cuptorului nu depăşeşte circa 50 kW) sau de înaltă tensiune ale întreprinderii. Schema electrică conţine siguranţe fuzibile pentru protecţia contra scurtcircuitelor şi un contactor pentru conectarea sau deconectarea cuptorului.

Reglarea temperaturii în conformitate cu cerinţele procesului tehnologic se realizează modificînd puterea cuptorului prin variaţia tensiunii de alimentare sau prin modificarea conexiunilor rezistoarelor.

Tensiunea de alimentare poate fi variată prin:

— schimbarea raportului de transformare al transformatorului cu ajutorul unui comutator de prize, sub sarcină;

— comutarea conexiunii primare a transformatorului din triunghi în stea (puterea cuptorului scade de trei ori);

— utilizarea autotransformatoarelor cu contacte alunecătoare;

— conectarea de reactanţe saturabile în serie cu cuptorul;

— utilizarea tiristoarelor în scheme de tip contactor.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.12

Exemplu de dimensionare a rezistoarelor unui cuptor electric

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Temperatura rezistorului	$\theta_1 = 1,1\ \theta_f$	$1,1 \cdot 1000$	1100°C
Rezistivitatea la temperatura de lucru	$\rho_\theta = \rho_{20}(1 + \alpha\Delta\theta)$ (tab. 3.8)	$\rho_{1100} = 1,1(1 + 0,035 \cdot 10^{-3} \cdot 1080)$	$1,138\ \frac{\Omega mm^2}{m}$
Puterea specifică a rezistorului ideal	(fig. 3.21)	$P^*_{s\,id} = 3 \cdot 10^4\ W/m^2$	$3 \cdot 10^4\ W/m^2$
Coeficientul de eficiență a radiației pentru spirală de sîrmă pe tuburi	tab. 3.11	$\alpha_{ef} = 0,46$	0,46
Puterea specifică a rezistorului	(3.49)	$P_s = 0,8 \cdot 0,46 \cdot 3 \cdot 10^4$	$1,104 \cdot 10^4\ \frac{W}{m^2}$
Diametrul rezistorului	(3.53)	$d = 10\sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,138 \cdot (15 \cdot 10^3)^2}{\pi^2 \cdot 380^2 \cdot 1,104 \cdot 10^4}}$	$\simeq 4$ mm
Lungimea rezistorului	(3.54)	$l = 10^2\sqrt[3]{\frac{15 \cdot 10^3 \cdot 380}{4\pi \cdot 1,138 \cdot (1,104 \cdot 10^4)^2}}$	$\simeq 110$ m
Randamentul electric	(apreciere)	$\eta_e = 0,95$	0,95
Randamentul total	(3.1) tab. 3.10	$\eta = 0,95 \cdot 0,812$	0,78
Consumul specific de energie	(3.8); tab. 3.10	$Q_s = \frac{0,21}{0,78}$	0,270 kWh/kg

Tiristoarele folosite pentru alimentarea cuptoarelor sînt legate în antiparalel pe fiecare fază (fig. 3.23). Cînd faza tensiunii de comandă a tiristoarelor corespunde cu faza tensiunii de alimentare, atunci acestea sînt deschise și puterea cuptorului are valoarea maximă. Dacă se realizează un defazaj între tensiunea de comandă și tensiunea rețelei (cu ajutorul unei scheme de defazare incluse în blocul de comandă al tiristoarelor *BCT*), atunci o parte din perioadă tiristoarele nu vor conduce, micșorîndu-se în acest mod puterea cuptorului.

În cuptoarele trifazate rezistoarele se pot comuta din triunghi în stea, iar rezistoarele unei faze pot fi comutate din paralel în serie (puterea se

Scanned with OKEN Scanner

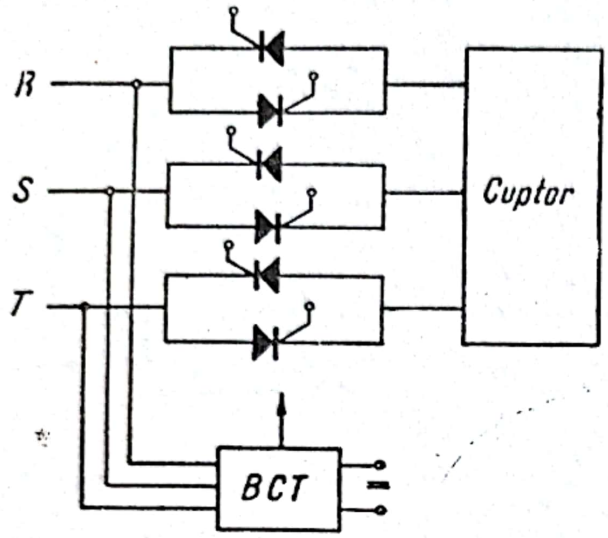
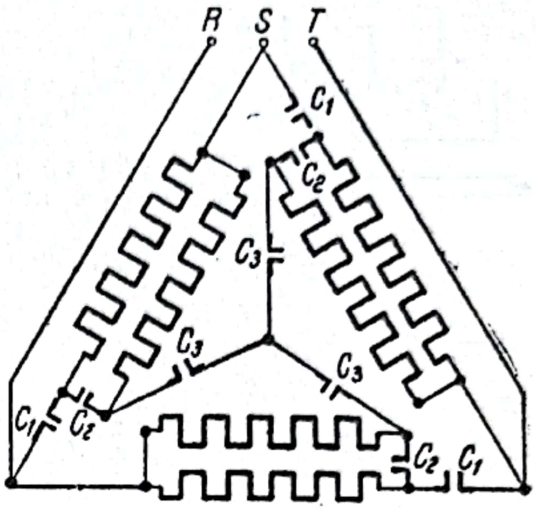


Fig. 3.23. Schema conectării tiristoarelor pentru comanda puterii cuptoarelor cu rezistoare.



Puterea	Conexiunea rezistoarelor		C_1	C_2	C_3
100,0 %	Δ	Δ	X	X	—
66,6 %	Δ	Y	X	—	X
33,3 %	Y	Y	—	X	X

Fig. 3.24. Schemă de modificare a conexiunii rezistoarelor.

micşorează de patru ori) ; în acest mod se poate realiza o variaţie în trepte a puterii cuptorului (fig. 3.24).

Reglarea automată a temperaturii cuptorului se realizează fie discontinuu, utilizînd regulatoare cu două sau trei poziţii, fie liniar cu regulatoare tip *PI* sau *PID* (proporţional-integral-derivativ).

În figura 3.25, *a* este dată schema electrică a reglării automate a temperaturii unui cuptor, utilizînd un regulator cu două poziţii, care asigură conectarea sau deconectarea rezistoarelor în funcţie de temperatura cuptorului.

După cum se observă din figura 3.25, *b*, temperatura cuptorului θ_c se află în regim tranzitoriu permanent ; abaterea $\Delta\theta$ a temperaturii de la valoarea prescrisă depinde de timpul mort T_m, de panta curbei de încălzire tgα şi de gradul de sensibilitate $\Delta\theta_s$ al regulatorului, conform relaţiei

$$\Delta\theta \simeq T_m \cdot \mathrm{tg}\alpha + \Delta\theta_s. \qquad (3.58)$$

Temperatura cuptorului creşte în intervalul T_m chiar după deconectarea rezistoarelor, cu o viteză ce depinde de panta tgα. Pentru procesele de încălzire la care raportul $T_m/T > 0{,}2$ (T fiind constanta de timp a procesului), frecvenţa oscilaţiilor temperaturii creşte prea mult şi se impune utilizarea

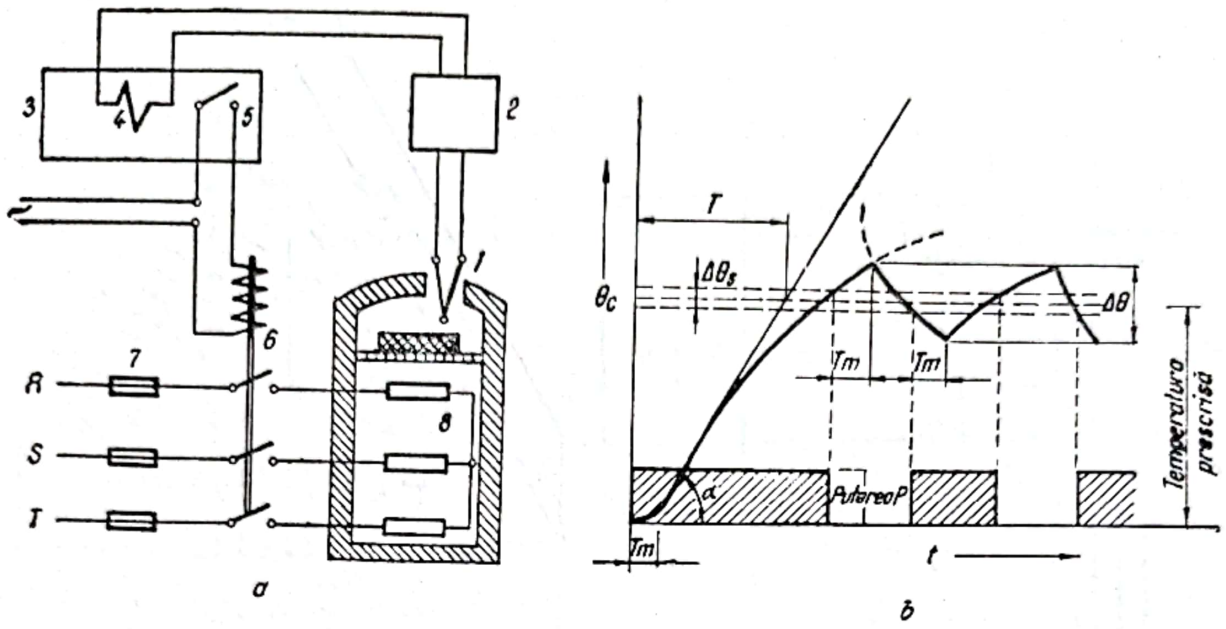


Fig. 3.25. Reglarea automată a temperaturii cuptorului cu rezistoare, utilizînd un regulator cu două poziţii:

a — schema electrică; *b* — variaţia temperaturii şi a puterii cuptorului. *1* — termocuplu; *2* — termostat; *3* — regulator; *4* — milivoltmetru; *5* — întreruptor comandat de acul indicator al milivoltmetrului; *6* — contactor; *7* — siguranţe fuzibile; *8* — rezistoarele cuptorului.

regulatoarelor liniare [16]. Aceste regulatoare constau dintr-un compensator cu autocompensare (§ 3.1.5) al cărui motor electric comandă modificarea puterii cuptorului.

3.2.5. Instalaţii electrotermice cu rezistoare cu încălzire directă

Încălzirea directă a pieselor de secţiune mică şi lungime mare (bare, ţevi, sîrme, table) prin curentul electric care le parcurge, este utilizată în secţiile de forjare şi laminare ale întreprinderilor, datorită avantajelor pe care le prezintă faţă de încălzirea prin inducţie sau indirectă cu rezistoare: timp redus de încălzire (0,3...3 minute), randament ridicat (70...90%), consum specific de energie redus (250...400 kWh/t) şi încadrare optimă în procesul tehnologic.

Instalaţia de încălzire constă din două cărucioare prevăzute cu contacte răcite cu apă, care se presează pe semifabricatul ce urmează a fi încălzit (fig. 3.26).

Alimentarea cu energie electrică a acestei instalaţii (fig. 3.27) se realizează printr-o reţea scurtă (§ 3.5.3) de către un transformator special avînd puterea de 100...2 000 kVA şi tensiunea secundară de ordinul a 5...25 V; datorită curenţilor mari ceruţi (mii sau zeci de mii de amperi), înfăşurarea secundară a transformatorului se execută din ţevi de cupru răcite cu apă.

Rezistenţa semifabricatului se măreşte în timpul încălzirii, datorită creşterii rezistivităţii materialului cu temperatura. În cazul materialelor

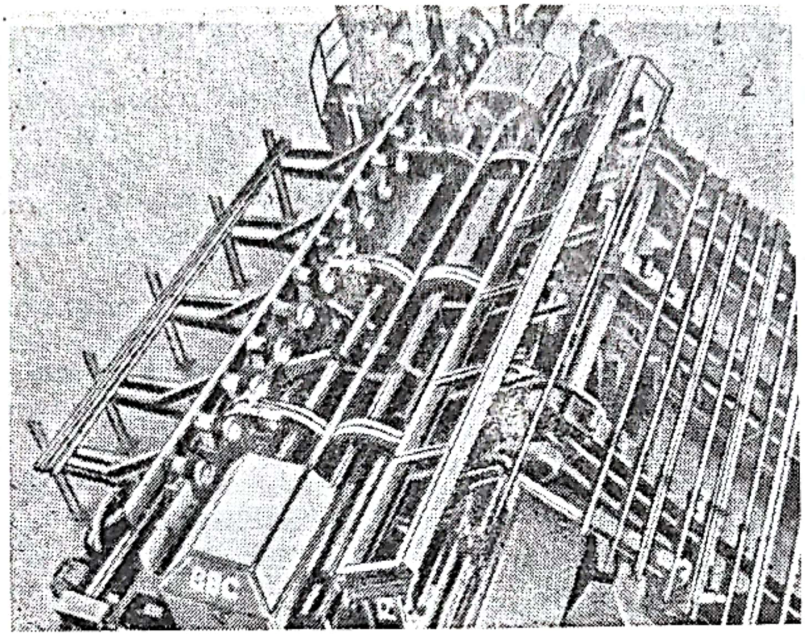


Fig.3.26. Instalația de încălzire directă a barelor de oțel.

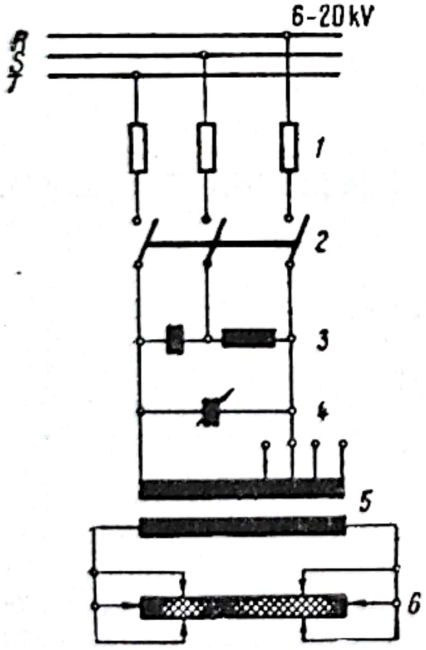


Fig. 3.27. Schema electrică de alimentare a instalației de încălzire directă :

1 — siguranțe fuzibile; *2* — întrerupător automat; *3* — instalația de simetrizare; *4* — condensatoare de derivație; *5* — transformator; *6* — contacte fixate pe semifabricat.

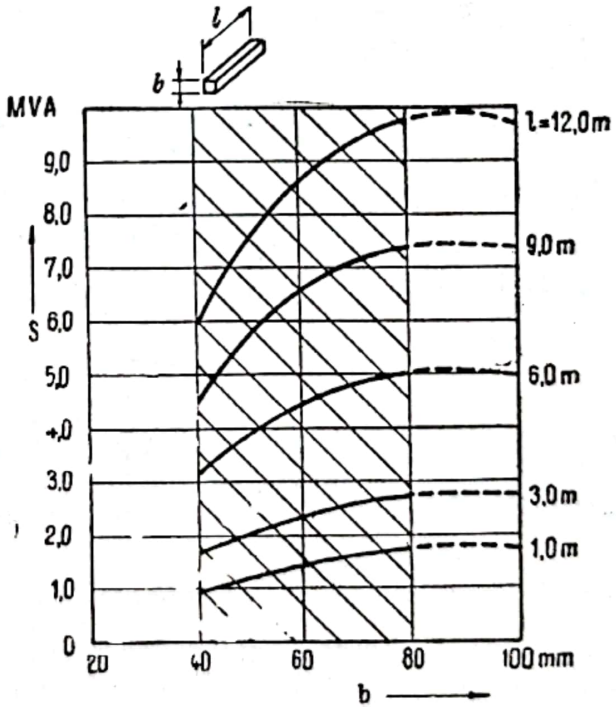


Fig. 3.28. Puterea *S* a transformatorului de alimentare în dependență de dimensiunile unei bare de oțel.

Scanned with OKEN Scanner

magnetice, se produce variaţia rezistenţei şi reactanţei semifabricatului ca urmare a creşterii adîncimii de pătrundere a curentului (§ 3.3.1, *a*), o dată cu mărirea temperaturii; factorul de putere al instalaţiei variază deci în timpul încălzirii între 0,4 şi 0,9 [20]. Compensarea acestuia se face cu ajutorul condensatoarelor derivaţie, avînd capacitatea variabilă. Instalaţia de simetrizare, constînd dintr-o baterie de condensatoare şi o bobină de reactanţă, are rolul de a transforma sarcina monofazată reprezentată de instalaţia de încălzire într-o sarcină trifazată echilibrată (§ 3.3.7).

Determinarea prin calcul a valorilor rezistenţei şi reactanţei semifabricatului este dificilă şi de aceea, proiectarea instalaţiilor cu încălzire directă se face pe baza datelor experimentale asupra vitezelor medii de degajare a căldurii în semifabricate avînd o lungime de 0,1 m. Puterea medie dezvoltată la încălzirea pieselor de oţel cu diametrul de 10...60 mm, pînă la temperatura de 1 100...1 200°C este $a = 17...25$ kW pe 0,1 m lungime de semifabricat [18]; timpul de încălzire a semifabricatului, de la temperatura iniţială θ_i la temperatura finală θ_f este

$$t = \frac{m_{0,1}c(\theta_f - \theta_i)}{a} \cdot 10^{-3} \quad [s], \tag{3.59}$$

în care: $m_{0,1}$ este masa a 0,1 m lungime de semifabricat, în kg;
c — căldura specifică a materialului, în J/kg · grd.

Puterea activă a transformatorului este

$$P = \frac{mc(\theta_f - \theta_i)}{\eta \cdot t} \quad 10^{-3} = \frac{am}{\eta m_{0,1}} \quad [kW], \tag{3.60}$$

în care: m este masa semifabricatului, în kg;
η — randamentul mediu al instalaţiei de încălzire (70...90%).

Puterea aparentă este

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad [kVA],$$

valorile medii ale factorului de putere fiind cuprinse între 0,8...0,85.

În figura 3.28 sînt date valori orientative pentru puterea S a transformatorului în funcţie de dimensiunile unei bare de oţel.

3.2.6. Încălzirea cu radiaţii infraroşii

Radiaţiile infraroşii emise de corpurile încălzite sînt unde electromagnetice cu lungimea de undă cuprinsă între 0,76...100μm. Radiaţiile care au însă cea mai mare aplicabilitate în tehnică nu depăşesc 20μm. Orice corp care primeşte radiaţii infraroşii absoarbe o parte din energia acestora, transformînd-o în căldură.

Încălzirea cu radiaţii infraroşii prezintă următoarele avantaje:

— timpul de încălzire este redus faţă de încălzirea prin conducţie sau convecţie, deoarece energia radiantă primită de corpul ce se încălzeşte

este practic independentă de temperatura acestuia, datorită temperaturii ridicate a sursei de radiații infraroșii;

— condiții excelente de curățenie și siguranță a exploatării;

— instalațiile de încălzire sînt relativ simple și ieftine, permițînd modificări constructive ușor de realizat;

— reglarea temperaturii se face continuu și precis;

— încălzirea corpurilor se produce nu numai la suprafață, ci și în profunzime.

Principalele domenii de utilizare a încălzirii cu radiații infraroșii, avînd în vedere că temperatura maximă a corpului încălzit nu depășește 300 °C, sînt următoarele: uscarea vopselelor în industria mașinilor și aparatelor; uscarea materialelor izolante ale conductoarelor electrice; uscarea materialelor textile și plastice; uscarea hîrtiei în toate fazele procesului tehnologic, a hîrtiei fotografice; uscarea miezurilor de turnătorie; prepararea diferitelor produse alimentare; uscarea pieilor tăbăcite, a încălțămintei; uscarea produselor chimico-farmaceutice; uscarea lemnului (lipirea); uscarea produselor agricole și deparazitarea semințelor; încălzirea încăperilor; tratamente medicale; creșterea animalelor.

Posibilitățile de utilizare a radiațiilor infraroșii pentru încălzirea corpurilor sînt legate de proprietățile absorbante și reflectante ale acestora, exprimate de factorii energetici de absorbție α și reflexie ρ (§ 2.2.1).

Pe lîngă natura corpurilor, valorile acestor factori energetici depind de lungimea de undă a radiației incidente și de grosimea stratului de străbătut.

Variația factorului de absorbție α al unui material (avînd o anumită grosime) în funcție de lungimea de undă λ, reprezintă spectrul de absorbție în infraroșu al acestui material (fig. 3.29).

Maximele spectrului de absorbție pun în evidență lungimile de undă ale radiațiilor infraroșii care sînt puternic absorbite de materialul respectiv. Pentru un randament optim al încălzirii, sursa de radiații infraroșii trebuie

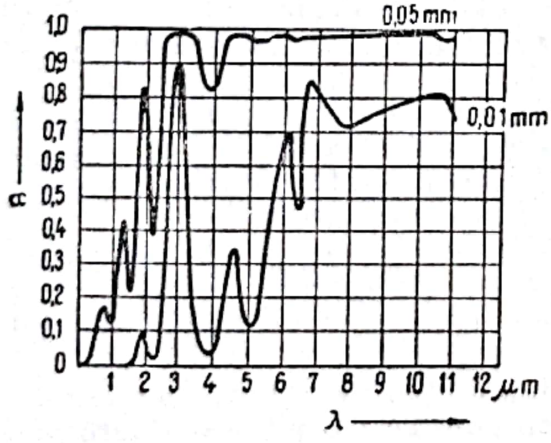


Fig. 3.29. Spectrul de absorbție în infraroșu al apei, pentru diferite grosimi de strat.

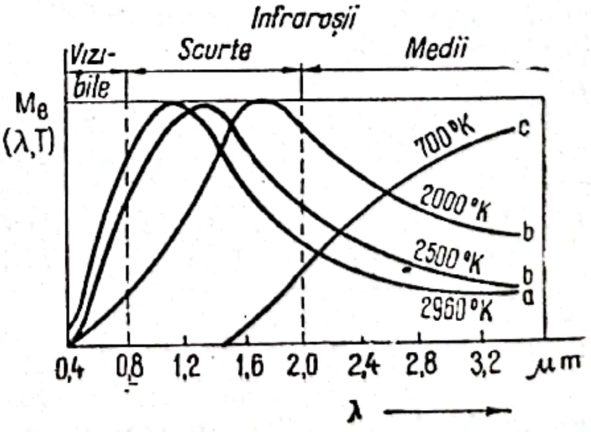


Fig. 3.30. Spectrele de emisie ale diferitelor surse de radiații infraroșii:

a — lampă cu incandescență normală; *b* — lampă cu incandescență pentru radiații infraroșii IR; *c* — lampă tubulară metalică și radiator ceramic.

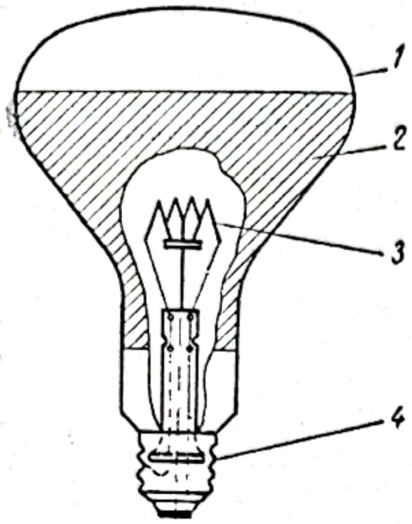


Fig. 3.31. Construcţia lămpii cu incandescenţă pentru radiaţii infraroşii IR:
1 — calotă mătuită; *2* — strat reflector de aluminiu; *3* — filament de wolfram; *4* — soclu.

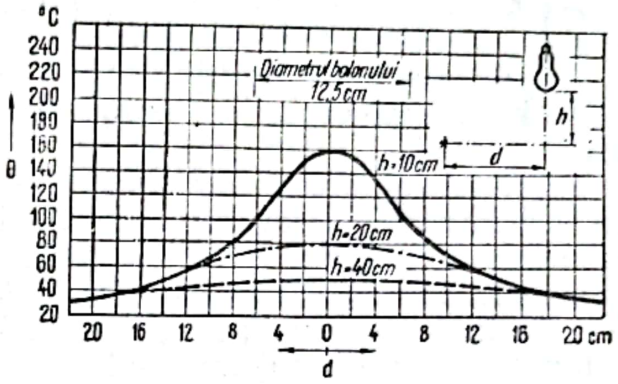


Fig. 3.32. Curbele de temperatură ale lămpi IR — 250 W.

astfel aleasă încît domeniul lungimilor de undă al radiaţiilor emise să fie cît mai apropiat de lungimea de undă pentru care factorul de absorbţie al corpului încălzit are valoarea maximă.

Sursele de radiaţii infraroşii. Curba de repartiţie spectrală a unei surse de radiaţii infraroşii (spectrul de emisie) reprezintă variaţia excitanţei energetice M_e (fluxul energetic emis de unitatea de suprafaţă a corpului radiator, în W/m²) în funcţie de lungimea de undă λ şi de temperatura T (fig. 3.30).

Sursele de radiaţii infraroşii se clasifică după lungimea de undă λ corespunzătoare maximului excitanţei din spectrul de emisie, în: surse de radiaţii infraroşii scurte avînd $\lambda \leqslant 2\mu m$, medii avînd $\lambda = 2 \ldots 4\mu m$ şi lungi avînd $\lambda > 4\mu m$.

Lămpile cu incandescenţă pentru radiaţii infraroşii IR, au filamentul de wolfram încălzit la o temperatură între 2 000 şi 2 500 °K, pentru ca majoritatea energiei radiante să se găsească în domeniul lungimilor de undă $\lambda = 1 \ldots 2\mu m$; durata de funcţionare este de circa 3 000 ore.

Construcţia acestor lămpi (fig. 3.31) se deosebeşte de cea a lămpilor cu incandescenţă normale printr-un strat reflector de aluminiu depus pe balonul de sticlă şi prin calota mătuită a balonului, cu scopul de a realiza o distribuţie uniformă a energiei radiante.

Aceste lămpi sînt construite pentru puteri de 100...1 000 W (la tensiunea nominală de 110, 220 V), variaţia puterii emisive putînd fi obţinută prin conectarea în serie sau independentă a mai multor filamente ale lămpii.

Distribuţia spaţială a temperaturilor unei lămpi este dată cu ajutorul curbelor de temperatură înregistrate în diferite puncte aflate la distanţa d de la axul lămpii, pentru diferite distanţe h între lampă şi obiect (fig. 3.32).

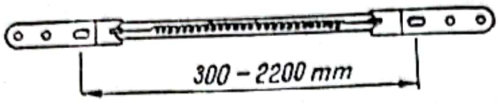


Fig. 3.33. Lampă tubulară din cuarț.

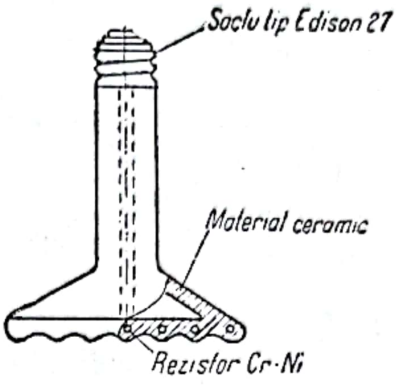


Fig. 3.34. Radiator ceramic tip disc.

Lămpile tubulare din cuarț (fig. 3.33) sînt surse de radiații infraroșii medii, dacă filamentul spiralizat al lămpii este din crom-nichel (temperatura de lucru 1 300...1 400°K) sau surse de radiații infraroșii scurte și medii, dacă filamentul este din wolfram (1 300...2 500°K). Filamentul înfășurat pe o bară de cuarț este introdus într-un tub protector din sticlă de cuarț, avînd un factor de transmisie în infraroșu mare pentru lungimi de undă pînă la 4μm. Prin utilizarea cuarțului opac (produs ceramic din cuarț), tubul protector devine un radiator secundar.

Puterile acestor lămpi variază între 100 și 7 500 W.

Concentrarea energiei radiante se realizează cu ajutorul unui reflector metalic, asemănător din punct de vedere constructiv cu corpurile de iluminat ale lămpilor fluorescente tubulare.

Lămpile tubulare metalice constau dintr-un tub de oțel refractar, în interiorul căruia se află o spirală de crom-nichel, izolată electric față de tubul metalic prin praf de oxid de magneziu. Temperatura de lucru a filamentului este de 700...900°K.

Deși au o greutate mai mare decît celelalte tipuri de lămpi, lămpile tubulare metalice, introduse în reflectoare parabolice se impun tot mai mult în instalațiile industriale, datorită rezistenței termice și mecanice ridicate.

Radiatoarele ceramice se compun dintr-un rezistor de încălzire (crom-nichel, kantal) înglobat într-un înveliș din material ceramic (fig. 3.34) avînd rolul de radiator secundar. Din punct de vedere constructiv se deosebesc radiatoare tubulare, inelare, concave și plate (disc). Radiațiile infraroșii emise sînt medii și lungi, temperatura de lucru a filamentului este de 1 000°K, puterile radiatoarelor fiind 150...1 000 W la tensiunea de 110 și 220 V a rețelei de alimentare.

Calculul instalațiilor de încălzire cu radiații infraroșii constă dintr-un calcul termic general, avînd drept scop determinarea cantității de căldură necesară procesului de încălzire sau uscare, executarea pe această bază a unei instalații de probă pentru stabilirea parametrilor de proiectare și în final calculul instalației industriale.

Scanned with OKEN Scanner

În cazul general al uscării unui material, cantitatea de căldură necesară este

$$Q = \frac{1}{\eta}(Q_s + Q_l + Q_e) \quad [J], \tag{3.61}$$

unde

$$Q_s = \frac{m_s c_s(\theta_f - \theta_i)}{\alpha_s}\ ;\quad Q_l = \frac{m_l c_l(\theta_f - \theta_i)}{\alpha_l}\ ;\quad Q_e = \frac{m_l \cdot c_v}{\alpha_l},$$

în care: Q_s, Q_l, Q_e este cantitatea de căldură necesară încălzirii corpului solid, lichidului, respectiv evaporării lichidului, în J;
m_s, m_l — masa solidului, respectiv lichidului, în kg;
c_s, c_l — căldura specifică a solidului, respectiv lichidului, în J/kg · grd;
c_v — căldura latentă de vaporizare a lichidului, în J/kg;
θ_f, θ_i — temperatura finală, respectiv inițială, în grd;
α_s, α_l — factorul de absorbție în infraroșu al solidului, respectiv al lichidului;
η — randamentul instalației (0,2...0,7).

Caracteristicile materialelor (călduri specifice, factori de absorbție în infraroșu) sînt date în lucrarea [51].

Cunoscînd Q și timpul de încălzire sau uscare t, în s, numărul necesar de lămpi este

$$n = \frac{Q}{Pt}, \tag{3.62}$$

P fiind puterea unei lămpi, în W.

Pe baza acestor calcule se construiește o instalație de probă așezînd lămpile pe panouri radiante, în linie sau în șah (fig. 3.35).

Timpul de încălzire sau uscare depinde de temperatura care trebuie realizată, temperatură care este legată de modul de așezare a lămpilor (distanța d dintre lămpi) și de distanța h dintre lămpi și obiectele încălzite. Modificînd d și h se obțin curbele de temperatură ale panoului radiant (fig. 3.36) în condițiile realizării uniformității impuse a temperaturilor ($\theta_{min}/\theta_{max} = 0{,}6 \ldots 0{,}8$), și a unui randament mare al instalației: orientativ $d \simeq 0{,}5\ h$.

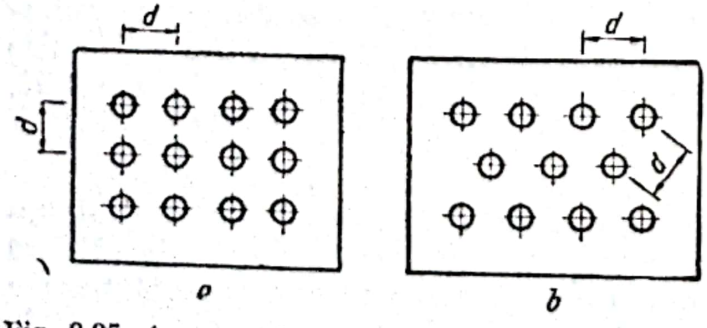


Fig. 3.35. Așezarea lămpilor cu radiații infraroșii: a — în linie; b — în șah.

Din figură se observă că uniformitatea temperaturilor se mărește pe măsură ce distanța lampă-obiect crește, însă randamentul instalației scade.

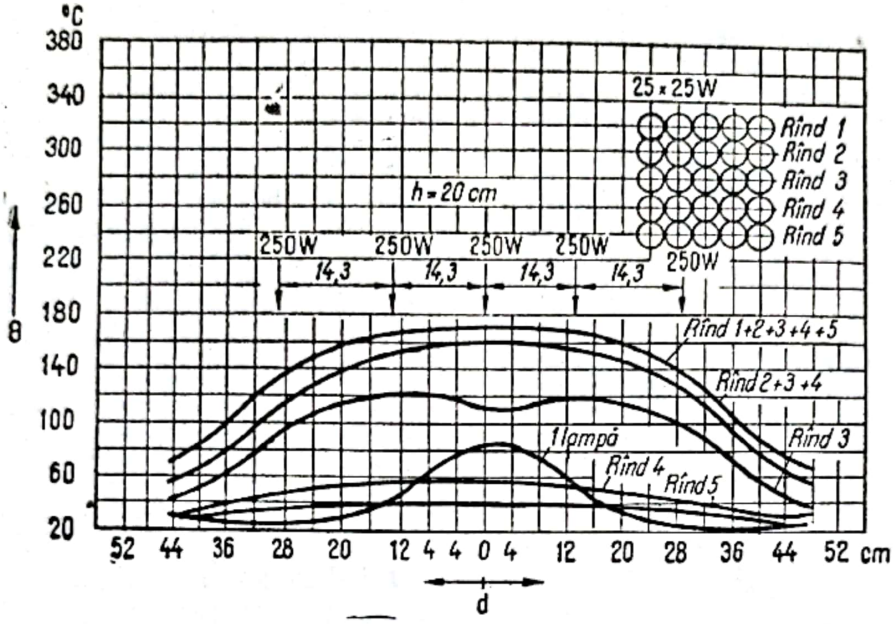


Fig. 3.36. Curbele de temperatură în diferite secţiuni longitudinale ale unui panou radiant compus din 5 × 5 lămpi IR de 250 W.

Majoritatea instalaţiilor industriale de încălzire (cuptoare) cu radiaţii infraroşii sînt cu funcţionare continuă, materialele ce urmează a fi încălzite deplasîndu-se prin tunele de formă similară cu cea a secţiunii lor (fig. 3.37, *a*), sau rotindu-se în timpul deplasării prin faţa unui panou cu lămpi (fig. 3.37, *b*).

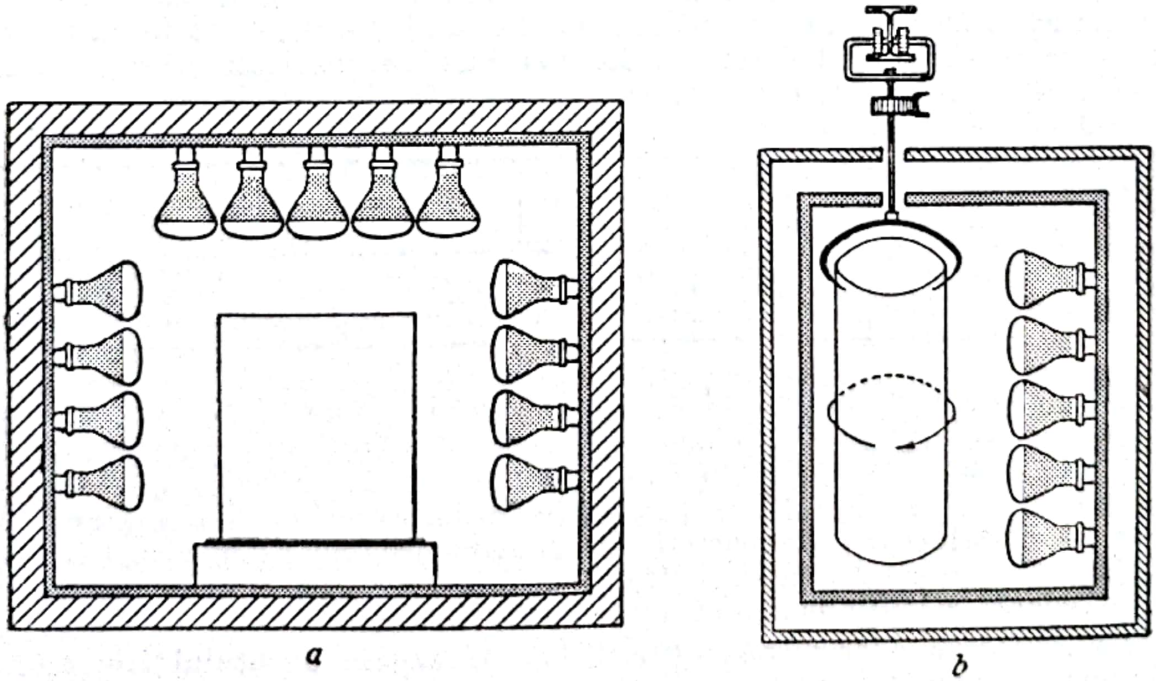


Fig. 3.37. Încălzirea pieselor tridimensionale în cuptorul tunel:
a — cu trei panouri radiante; *b* — cu un panou radiant.

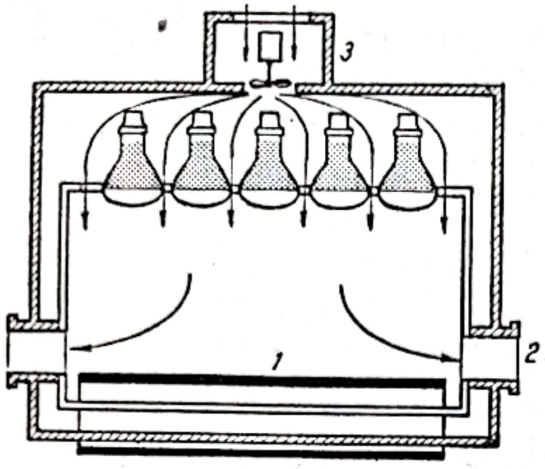


Fig. 3.38. Ventilaţia forţată a unui cuptor tunel:
1 — bandă rulantă; *2* — guri de refulare; *3* — ventilator.

Materialele plane sînt deplasate în faţa panourilor radiante pe benzi rulante; în industria textilă banda rulantă este formată din însăşi materialul textil, căruia i se impune un drum în zig-zag. Încălzirea materialelor filiforme se face prin trecerea repetată a firului prin zona de încălzire. Materialele granulate sînt transportate pe benzi rulante prin faţa panourilor radiante.

Ventilaţia tunelelor, în cazul în care prin uscare se degajă cantităţi mari de vapori, gaze inflamabile, etc. se realizează cu ajutorul ventilatoarelor montate deasupra benzii şi a gurilor de refulare aşezate din loc în loc de-a lungul uscătorului (fig. 3.38).

Instalaţia de alimentare cu energie electrică se execută cu mai multe circuite, astfel încît să se poată întrerupe separat cel puţin fiecare rînd transversal de lămpi.

3.2.7. Aparate electrocasnice

Aparatele electrocasnice sînt utilizate pentru conservarea şi pregătirea alimentelor, încălzirea apei, spălatul rufelor şi al veselei, călcatul hainelor, încălzirea şi curăţirea locuinţelor. Consumul de energie electrică în decursul unei luni este indicat mai jos, pentru o bucătărie complet electrificată.

Numărul de persoane	2	3	4	5	6
kWh/lună	50...60	60...72	72...90	78...105	86...117

Frigidere. Conservarea prin frig a alimentelor este superioară altor metode de conservare prin aceea că menţine calitatea alimentelor şi împiedică dezvoltarea microorganismelor dăunătoare.

Funcţionarea frigiderelor se bazează pe absorbţia căldurii din interiorul camerei frigorifice, prin vaporizarea unui agent frigorigen (amoniac, freon—CF_2Cl_2, clorură de metil—CH_3Cl), urmată de condensarea vaporilor prin cedarea căldurii mediului exterior.

La frigiderele cu compresor (fig. 3.39, *a*), vaporii agentului frigorigen produşi în vaporizatorul V sînt absorbiţi de un compresor C şi comprimaţi în condensatorul C_d printr-un sistem de supape. Agentul frigorigen lichid

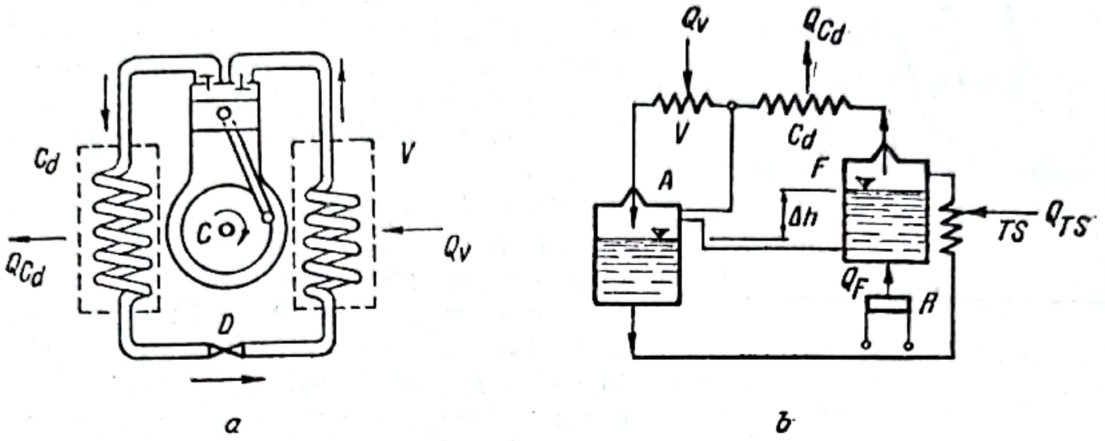


Fig. 3.39. Frigiderul cu compresor *a* şi cu absorbţie *b*.

obţinut în condensator va trece în vaporizator prin destinzătorul D, (avînd rolul de a separa incinta de joasă presiune a vaporizatorului, de incinta de înaltă presiune a condensatorului), ciclul frigorific reluîndu-se.

Frigiderele cu absorbţie (fig. 3.39, *b*) produc vaporizarea soluţiei de amoniac într-un fierbător F, încălzit cu rezistoarele R. Vaporii trec în condensatorul C_d unde sînt lichefiaţi prin cedarea căldurii acumulate în fierbător; amoniacul lichefiat curge în vaporizatorul V (aflat în camera frigorifică), unde este din nou vaporizat la o presiune scăzută, prin absorbţie de căldură.

Absorbitorul A primeşte soluţie slabă de amoniac din fierbător (datorită diferenţei de nivel Δh), iar din vaporizator absoarbe vapori bogaţi în amoniac; soluţia din absorbitor îşi măreşte astfel concentraţia de amoniac şi printr-un termosifon TS trece în fierbător.

Frigiderele cu absorbţie nu au elemente în mişcare, deci se uzează mai greu decît cele cu compresor; în schimb temperatura nu este atît de scăzută şi eficienţa frigorifică este inferioară celor cu compresor.

Frigiderele termoelectrice se construiesc deocamdată pentru capacităţi mici, pînă la 50 litri. Aceste frigidere sînt simple, robuste şi au o mare durată de funcţionare, în schimb eficienţa frigorifică este mai mică şi preţul de cost mai ridicat.

Funcţionarea se bazează pe efectul Peltier; la trecerea unui curent electric printr-un circuit format din două metale diferite sudate la ambele capete, între cele două suduri va apare o diferenţă de temperatură, una dintre suduri absorbind căldura, iar cealaltă cedînd-o mediului ambiant. Utilizînd semiconductoare în locul metalelor, diferenţa de temperatură va fi mai ridicată.

Frigiderele termoelectrice utilizează o baterie termoelectrică compusă din mai multe termoelemente legate în serie (fig. 3.40), sudurile reci formînd o suprafaţă rece în incinta frigorifică, iar sudurile calde — o suprafaţă caldă în exterior. În acest mod se obţin temperaturi de —38 °C, la un curent de 15 A, furnizat de un redresor sau o baterie de acumulatoare.

Scanned with OKEN Scanner

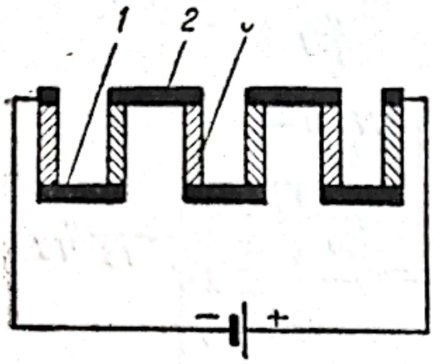


Fig. 3.40. Baterie termoelectrică:
1 — suprafaţă rece; *2* — suprafaţă caldă; *3* — semiconductoare.

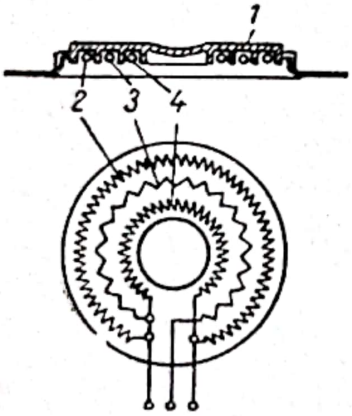


Fig. 3.41. Plită electrică.

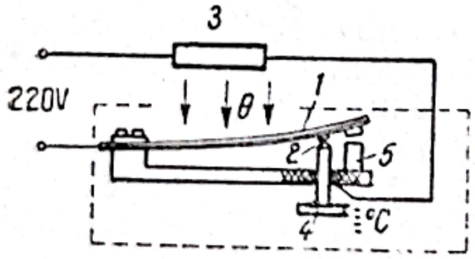


Fig. 3.42. Regulator de temperatură cu două poziţii:
1 — bimetal; *2* — contact electric; *3* — rezistor de încălzire; *4* — şurub pentru reglarea temperaturii; *5* — magnet permanent.

Pregătirea alimentelor se face cu ajutorul *agregatului universal pentru bucătărie* acţionat de un motor electric şi prevăzut cu dispozitive pentru tocat carnea, storsul fructelor, bătutul ouălor, măcinatul cafelei etc.

Cele mai răspîndite aparate pentru gătitul alimentelor sînt plitele, cuptoarele şi maşinile de gătit electrice. Cu ajutorul acestor aparate se realizează: fierberea alimentelor care necesită o temperatură de 110°C la suprafaţa plitei; coacerea în cuptor la o temperatură de 250°C la suprafaţa plitei; frigerea la grătar.

Utilizarea acestor aparate prezintă numeroase avantaje faţă de utilizarea încălzirii cu ajutorul combustibililor solizi, lichizi sau gazoşi şi anume: prepararea se face repede şi curat, fără fum şi gaze de ardere; temperatura şi durata pot fi reglate automat; încălzirea este uniformă; sînt simple şi uşor de manevrat.

Plitele electrice (fig. 3.41) constau dintr-o placă metalică *1*, în ale cărei şanţuri sînt aşezate rezistoarele *2*, *3*, *4* de crom-nichel spiralate, izolate faţă de placă prin praf de magnezită. Prin comutarea conexiunilor rezistoarelor se modifică puterea absorbită şi deci, temperatura la suprafaţa plitei. Reglajul automat al temperaturii se realizează cu ajutorul unui regulator cu două poziţii, bimetalic (fig. 3.42) alimentat de la rezistorul *3* al plitei electrice din figura 3.41. În funcţie de temperatura plitei se întrerupe sau se stabileşte alimentarea rezistoarelor de încălzire.

Cuptoarele electrocasnice sînt formate dintr-o carcasă izolantă din punct de vedere termic, în interiorul căreia sînt aşezate elementele încălzitoare: rezistoare sau radiatoare infraroşii.

Maşinile de gătit constau din plite şi cuptoare electrice, puterea totală putînd fi reglată între 100 şi 5 000 W.

Apa caldă necesară gătitului, spălatului vaselor sau a rufelor, băilor, se obţine cu ajutorul *acumulatoarelor de apă caldă* (boilere). Ele constau în principiu dintr-un rezistor de încălzire în ţeavă metalică *1*, (fig. 3.43) legat

Scanned with OKEN Scanner

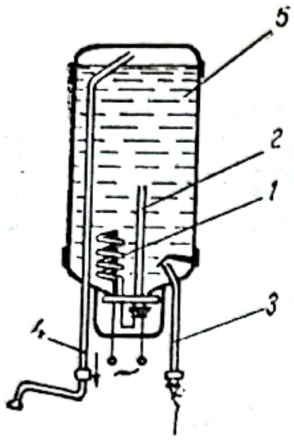


Fig. 3.43. Boiler electric.

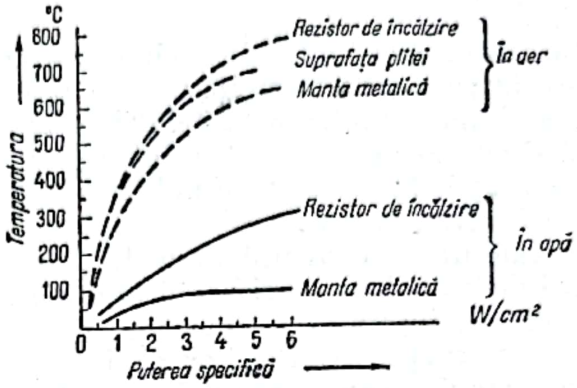


Fig. 3.44. Puterile specifice ale rezistoarelor utilizate în aparatele electrocasnice.

în serie cu dispozitivul de reglare a temperaturii *2*; rezervorul de apă *5* este alimentat cu apă rece prin conducta *3*, apa caldă curgînd prin conducta *4*. Capacităţile boilerelor sînt foarte diferite (5...120 litri) în funcţie de utilizare; puterile de ordinul a 400...6 000 W permit încălzirea apei în 15 minute...8 ore.

Puterile specifice ale rezistoarelor utilizate în aparatele electrocasnice sînt date în figura 3.44, în funcţie de temperatura necesară la suprafaţa încălzitorului.

Maşinile de spălat se bazează pe obţinerea unei mişcări de frecare a rufelor aflate într-o soluţie detergentă, cu ajutorul unui rotor hidraulic. Maşinile de spălat rufe au şi un sistem de încălzire prin rezistoare a apei şi unul de stoarcere a rufelor prin centrifugare. Rotorul hidraulic şi centrifuga de uscare sînt antrenate de motoare electrice monofazate cu poli ecranaţi, prezentînd avantajele lipsei periilor şi a colectorului.

În *maşinile de spălat vesela*, apa încălzită este antrenată de o pompă hidraulică acţionată electric, într-un sistem de ajutaje, cărora li se poate da orientarea dorită.

Fiarele de călcat au o suprafaţă plană (talpa) încălzită cu rezistoare spiralate de sîrmă fixate într-un suport ceramic. Reglajul automat al temperaturii se realizează în funcţie de natura ţesăturii, cu ajutorul unui regulator bimetalic.

Pentru încălzirea locuinţelor se utilizează *sobele cu acumulare* şi sursele de radiaţii infraroşii (lămpi tubulare din cuarţ sau metalice).

Sobele cu acumulare constau dintr-o masă de acumulare a căldurii (nisip, talc granulat, plăci de fontă) încălzită cu rezistoare. Căldura acumulată este cedată aerului care trece prin canalele din interiorul sobei. Avantajul acestei sobe îl constituie faptul că încălzirea se face în timpul nopţii, contribuindu-se astfel la aplatisarea curbei de sarcină, iar ziua soba radiază căldura acumulată, alimentarea cu energie electrică fiind întreruptă.

3.3. ÎNCĂLZIREA PRIN INDUCŢIE

Încălzirea prin inducţie se bazează pe pătrunderea energiei electromagnetice într-un conductor masiv situat în cîmpul magnetic variabil în timp al unei bobine (inductor); încălzirea conductorului se produce prin efectul Joule-Lenz al curenţilor turbionari induşi.

Avantajele încălzirii prin inducţie în comparaţie cu alte metode de încălzire sînt următoarele:

— căldura se dezvoltă în metalul ce urmează a fi încălzit, rezultînd o viteză de încălzire mai ridicată în comparaţie cu cea obţinută în cuptoarele cu încălzire indirectă;

— construcţia instalaţiilor de încălzire este mai simplă, permiţînd utilizarea vidului sau a atmosferelor de protecţie şi automatizarea funcţionării în condiţiile producţiei în flux;

— condiţiile de lucru sînt mult îmbunătăţite.

Încălzirea prin inducţie a materialelor conductoare din punct de vedere electric este utilizată pentru: topirea metalelor (oţel, fontă, cupru, aluminiu, zinc, magneziu şi aliajele lor); încălzirea în volum (profunzime) a semifabricatelor (oţel, cupru, aluminiu) ce urmează a fi prelucrate la cald prin forjare, matriţare, presare, laminare etc; călirea superficială a pieselor; sudarea şi lipirea metalelor.

Clasificarea instalaţiilor electrotermice bazate pe inducţie este indicată în figura 3.45.

Aceste instalaţii pot fi alimentate cu tensiune de frecvenţă joasă (sub 50 Hz), industrială (50 Hz), medie (50...10 000 Hz) sau înaltă (peste 10 000 Hz). Cuptoarele electrice cu canal utilizează frecvenţele joase sau industriale, cele cu creuzet-frecvenţele industriale sau medii; instalaţiile de încălzire în volum funcţionează cu frecvenţe industriale sau medii, iar cele de călire superficială — cu frecvenţe înalte.

Din punct de vedere al deplasării materialelor ce urmează a fi încălzite, instalaţiile pot fi cu funcţionare intermitentă (periodică) sau continuă.

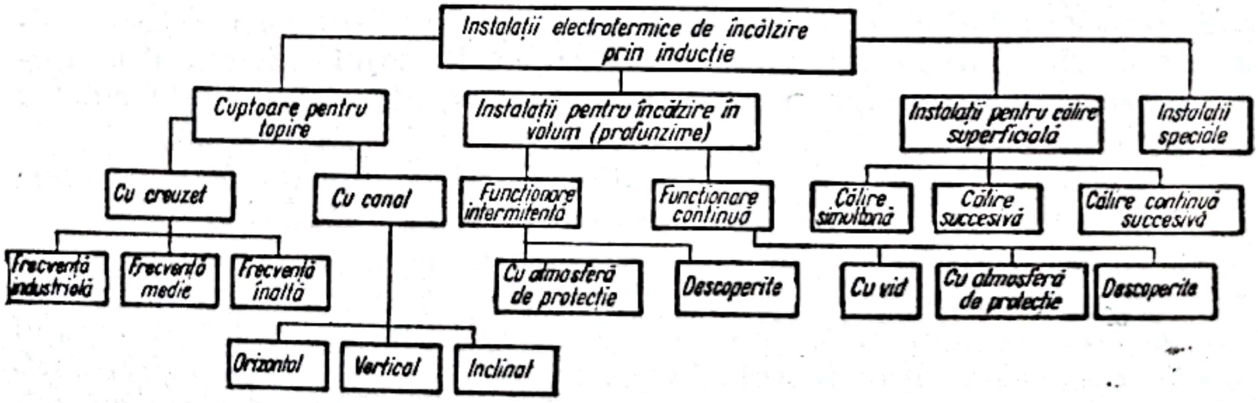


Fig. 3.45. Clasificarea instalaţiilor de încălzire prin inducţie.

Scanned with OKEN Scanner

3.3.1. Repartizarea curenților turbionari în conductoare plane

Determinarea repartizării curenților turbionari induși în conductoare masive și a puterilor corespunzătoare dezvoltate, se face pe baza ecuațiilor lui Maxwell pentru cîmpul electromagnetic (sub forma vectorială)

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J}; \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \bar{H} &= 0; \\ \operatorname{div} \bar{E} &= 0; \\ \bar{B} &= \mu \bar{H}; \\ \bar{J} &= \sigma \bar{E}. \end{aligned} \tag{3.63}$$

În aceste relații, E este intensitatea cîmpului electric; H — intensitatea cîmpului magnetic; B — inducția magnetică; J — densitatea curentului electric de conducție; σ — conductivitatea electrică a materialului conductor; μ — permeabilitatea magnetică.

Cu ajutorul formulelor analizei vectoriale aplicate relațiilor (3.63)

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \bar{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{H}) - \Delta \bar{H}, \tag{3.64}$$

se obține ecuația satisfăcută de cîmpul $\bar{H}$ în interiorul conductorului

$$\Delta \bar{H} = \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}, \tag{3.65}$$

în care Δ este operatorul laplacean

și cea satisfăcută de cîmpul $\bar{E}$

$$\bar{E} = \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \bar{H}. \tag{3.66}$$

Determinînd expresiile cîmpurilor $\bar{H}$ și $\bar{E}$ prin rezolvarea ecuațiilor (3.65) și (3.66), se obține energia electromagnetică absorbită de unitatea de suprafață a conductorului în unitatea de timp (puterea specifică) — vectorul densității fluxului de energie (vectorul lui Poynting)

$$\bar{S} = \bar{E} \times \bar{H}. \tag{3.67}$$

În cele ce urmează se va analiza pătrunderea energiei electromagnetice în conductoarele plane întîlnite la încălzirea prin inducție.

Scanned with OKEN Scanner

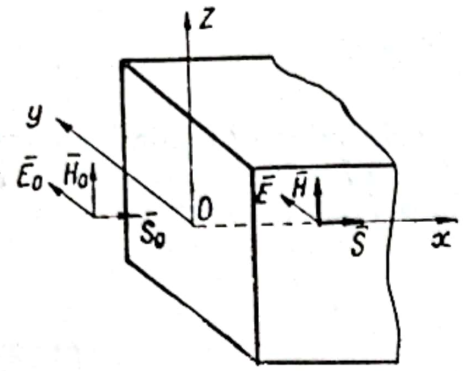


Fig. 3.46. Semispaţiul conductor infinit.

a. Semispaţiul conductor infinit. Considerăm un bloc din material conductor, limitat spre stînga de o faţă plană şi ocupînd întreg semispaţiul drept (fig. 3.46); cîmpul magnetic $\bar{H}_0$ la suprafaţă este orientat după axa *oz* şi are o variaţie sinusoidală în timp.

Datorită extinderii infinite a blocului şi a caracterului omogen al cîmpului $\bar{H}_0$, toate mărimile de stare locală a cîmpului electromagnetic sînt funcţiuni numai de coordonata x şi de timpul t, adică în interiorul blocului $\bar{H} = \bar{H}(x, t)$; $\bar{E} = \bar{E}(x, t)$; $\bar{J} = \bar{J}(x, t)$.

Determinarea cîmpurilor $\bar{H}$ şi $\bar{E}$. Exprimînd operatorul Δ în coordonate carteziene, ecuaţia (3.65) devine

$$\frac{\partial^2 H(x, t)}{\partial x^2} = \mu\sigma \frac{\partial H(x, t)}{\partial t}, \tag{3.68}$$

care, în regim permanent sinusoidal, se reprezintă în complex simplificat sub forma

$$\frac{\mathrm{d}^2 \underline{H}}{\mathrm{d}x^2} = \mathrm{j}\omega\mu\sigma \underline{H}, \tag{3.69}$$

astfel că

$$H(x, t) = Im\{\sqrt{2}\underline{H}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\}. \tag{3.70}$$

Soluţia generală a ecuaţiei (3.69) este

$$\underline{H} = \underline{A}\mathrm{e}^{\underline{\alpha}x} + \underline{B}\mathrm{e}^{\underline{\beta}x}, \tag{3.71}$$

în care $\underline{A}$, $\underline{B}$ sînt constante complexe arbitrare, iar $\underline{\alpha} = \sqrt{\mathrm{j}\omega\mu\sigma}$ şi $\underline{\beta} = -\sqrt{\mathrm{j}\omega\mu\sigma}$.

Notînd

$$k = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{1}{\delta}, \tag{3.72}$$

în care δ este adîncimea de pătrundere şi remarcînd că $\sqrt{\mathrm{j}} = (1 + \mathrm{j})/\sqrt{2}$, soluţia (3.71) devine

$$\underline{H} = \underline{A}\mathrm{e}^{(1+\mathrm{j})kx} + \underline{B}\mathrm{e}^{-(1+\mathrm{j})kx}. \tag{3.73}$$

Scanned with OKEN Scanner

Condițiile la limită: pentru $x = \infty$, $\underline{A} = 0$ (unda inversă trebuie să se anuleze pentru a avea cîmp magnetic finit la $x = \infty$); pentru $x = 0$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ și deci $\underline{B} = \underline{H}_0$.

Imaginea complexă a cîmpului magnetic în interiorul semispațiului conductor este

$$\underline{H} = \underline{H}_0 e^{-(1+j)kx} = \underline{H}_0 \cdot e^{-kx} \cdot e^{j\varphi}, \tag{3.74}$$

în care $\underline{H}_0 = H_0$ reprezintă valoarea eficace a cîmpului magnetic la suprafață, iar $\varphi = -kx$ este defazajul variabil al vectorului cîmp $\overline{H}$.

Din relațiile (3.70) și (3.74) rezultă valoarea instantanee a cîmpului magnetic

$$H(x, t) = H_0 \sqrt{2} e^{-kx} \sin(\omega t + \varphi). \tag{3.75}$$

Se observă că H variază ca o undă în spațiu și timp, amplitudinea descrescînd exponențial cu distanța x de la suprafață.

Densitatea de curent $\overline{J}$ și cîmpul $\overline{E}$ se deduc din prima ecuație (3.63), observînd că singurele componente nenule ale rot $\overline{H}$, și deci ale lui $\overline{J}$ și $\overline{E}$ sînt dirijate după axa *oy* (fig. 3.46), deoarece $\overline{H}$ este orientat după axa *oz*. În complex

$$\underline{J} = \sigma \underline{E} = -\frac{d\underline{H}}{dx}; \tag{3.76}$$

introducînd expresia (3.74), relația (3.76) devine

$$\underline{J} = \sigma \underline{E} = \underline{H}_0 (1 + j) k e^{-(1+j)kx}. \tag{3.77}$$

Intensitatea cîmpului electric este deci

$$\underline{E} = \underline{H}_0 (1 + j) k \rho e^{-(1+j)kx}, \tag{3.78}$$

deoarece $\sigma = 1/\rho$, ρ fiind rezistivitatea conductorului.

Puteri. Vectorul lui Poynting $\overline{S}$ exprimat de relația (3.67) este dirijat în sensul x — lor pozitivi (fig. 3.41); în complex simplificat

$$\underline{S} = \underline{E} \cdot \underline{H}^*, \tag{3.79}$$

în care $\underline{H}^*$ este conjugata mărimii complexe $\underline{H}$.

Înlocuind relațiile (3.74) și (3.78) în (3.79), se obține

$$\underline{S} = H_0^2 k \rho (1 + j) e^{-2kx} = S_a + jS_r, \tag{3.80}$$

în care S_a este puterea disipată prin efect Joule-Lenz pe unitatea de suprafață a conductorului, iar S_r -puterea reactivă pe unitatea de suprafață.

La suprafața semispațiului ($x = 0$)

$$\underline{S}_0 = H_0^2 k \rho (1 + j) = S_{a_0} + jS_{r_0}. \tag{3.81}$$

Scanned with OKEN Scanner

Factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{S_{a_0}}{\sqrt{S_{a_0}^2 + S_{r_0}^2}} = 0{,}707 \tag{3.82}$$

deoarece $S_{a_0} = S_{r_0}$.

Adîncimea de pătrundere a cîmpului electromagnetic. Valoarea eficace a densităţii de curent (rel. 3.77)

$$J = H_0 k \sqrt{2}\, e^{-kx}, \tag{3.83}$$

scade de la suprafaţa semispaţiului ($x = 0$)

$$J_0 = H_0 k \sqrt{2} \tag{3.84}$$

la

$$J_\delta = J_0 e^{-1} = 0{,}368 J_0. \tag{3.85}$$

pentru $x = \frac{1}{k} = \delta$ — adîncimea de pătrundere (fig. 3.47).

Puterea activă pe unitatea de suprafaţă (rel. 3.80) transformată în căldură în interiorul adîncimii de pătrundere δ, este $S_{a_0} - S_{a_\delta} = H_0^2 k \rho (1 - e^{-2})$, ceea ce înseamnă că

$$\frac{S_{a_0} - S_{a_\delta}}{S_{a_0}} = 1 - e^{-2} = 0{,}865, \tag{3.86}$$

adică 86,5% din puterea activă care pătrunde pe unitatea de suprafaţă a conductorului se transformă în căldură în zona cuprinsă de δ.

Adîncimea de pătrundere δ este o mărime caracteristică pătrunderii energiei electromagnetice în conductoare masive, relaţia de calcul fiind (vezi rel. 3.72).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \text{ sau } \delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad [\text{m}], \tag{3.87}$$

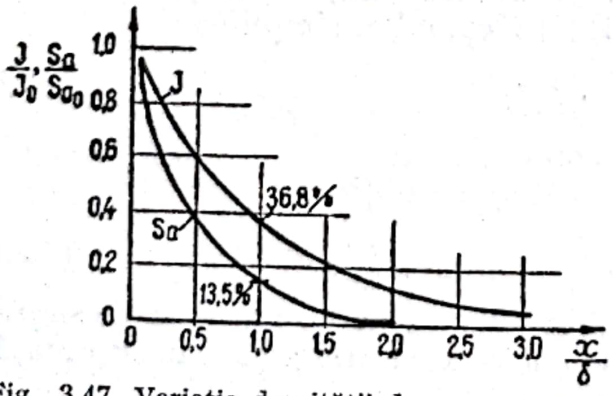


Fig. 3.47. Variaţia densităţii de curent J şi a puterii active pe unitatea de suprafaţă S_a cu raportul x/δ.

în care:

$\omega = 2\pi f$ este pulsaţia curentului de frecvenţă f;

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r$ — permeabilitatea magnetică, în H/m;

μ_r — permeabilitatea magnetică relativă;

ρ — rezistivitatea conductorului, în Ωm.

Adîncimea de pătrundere depinde deci de frecvenţa cîmpului magne-

tic, de permeabilitatea relativă μ_r și de rezistivitatea ρ a conductorului. În cazul încălzirii materialelor feromagnetice μ_r scade cu temperatura, ajungînd la $\mu_r = 1$ pentru 730°C (punctul Curie), iar ρ crește cu temperatura (tab. 3.13), ceea ce conduce la variația lui δ și cu temperatura (fig. 3.48).

Tabela 3.13

Principalele proprietăți ale metalelor încălzite prin inducție [50]

Denumirea	Temperatura de încălzire în volum °C	Temperatura de topire °C	Temperatura de golire °C	Densitatea ρ', kg/dm³		Rezistivitatea ρ $\times 10^{-8}$ Ωm		
				la 20°C	la temperatura de topire	la 20°C	la temperatura de încălzire	la temperatura de topire
Oțel	1000	1520	1650	7,8	7,2	10	130	136,6
Cupru electrotehnic	1000	1083	1225	8,89	8,3	1,75 (1,9, la 60°C)	10	21,0
Bronz Cu 58 Zn 40 Sn 2	—	920	1070	8,5	7,8	6,5	—	42,0
Alamă	850	940	1140	8,6	8,0	7,0	14,7	38,5
Aluminiu	600	658	700	2,7	2,4	2,9	11,3	24,0
Duraluminiu	—	658	700	2,8	2,5	4,95	—	28,0
Nichel	—	1452	1550	8,3	—	10...12	—	108...109
Zinc	—	419,2	500	6,86	6,48	6,0...6,2	—	33,4...36,4
Magneziu	—	651	700	1,74	—	4,4...4,8	—	—

Observație: pentru oțel feritic $\mu_r = 10 \ldots 100$ la temperaturi sub 730°C (punctul Curie) și $\mu_r = 1$ — peste 730°C

b. Conductorul plan de grosime finită a, excitat pe una din fețe, de cîmpul magnetic $\underline{H}_0$ (fig. 3.49, *a*).

Soluția generală a cîmpului $\underline{H}$ (rel. 3.73) cu *condițiile la limită:* pentru $x = 0$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ și pentru $x = a$, $\underline{H} = 0$ (rezultă din legea circuitului magnetic aplicată pe conturul Γ) este

$$\underline{H} = \underline{H}_0 \frac{\operatorname{sh}\,[(1+\mathrm{j})k(a-x)]}{\operatorname{sh}\,[(1+\mathrm{j})ka]}. \tag{3.88}$$

Cu relația (3.76), rezultă densitatea curentului și intensitatea cîmpului electric

$$\underline{J} = \frac{\underline{E}}{\rho} = \underline{H}_0 k(1+\mathrm{j}) \frac{\operatorname{ch}\,[(1+\mathrm{j})k(a-x)]}{\operatorname{sh}\,[(1+\mathrm{j})ka]}. \tag{3.89}$$

Relațiile (3.88) și (3.89) indică dependența mărimilor de stare ale cîmpului electromagnetic de adîncimea relativă de pătrundere $\varepsilon = a/\delta$.

Adîncimea de pătrundere δ nu mai reprezintă adîncimea reală de pătrundere (de-a lungul căreia J scade de $e = 2{,}71$ ori), ci numai un parametru a cărui valoare este independentă de dimensiunile geometrice ale

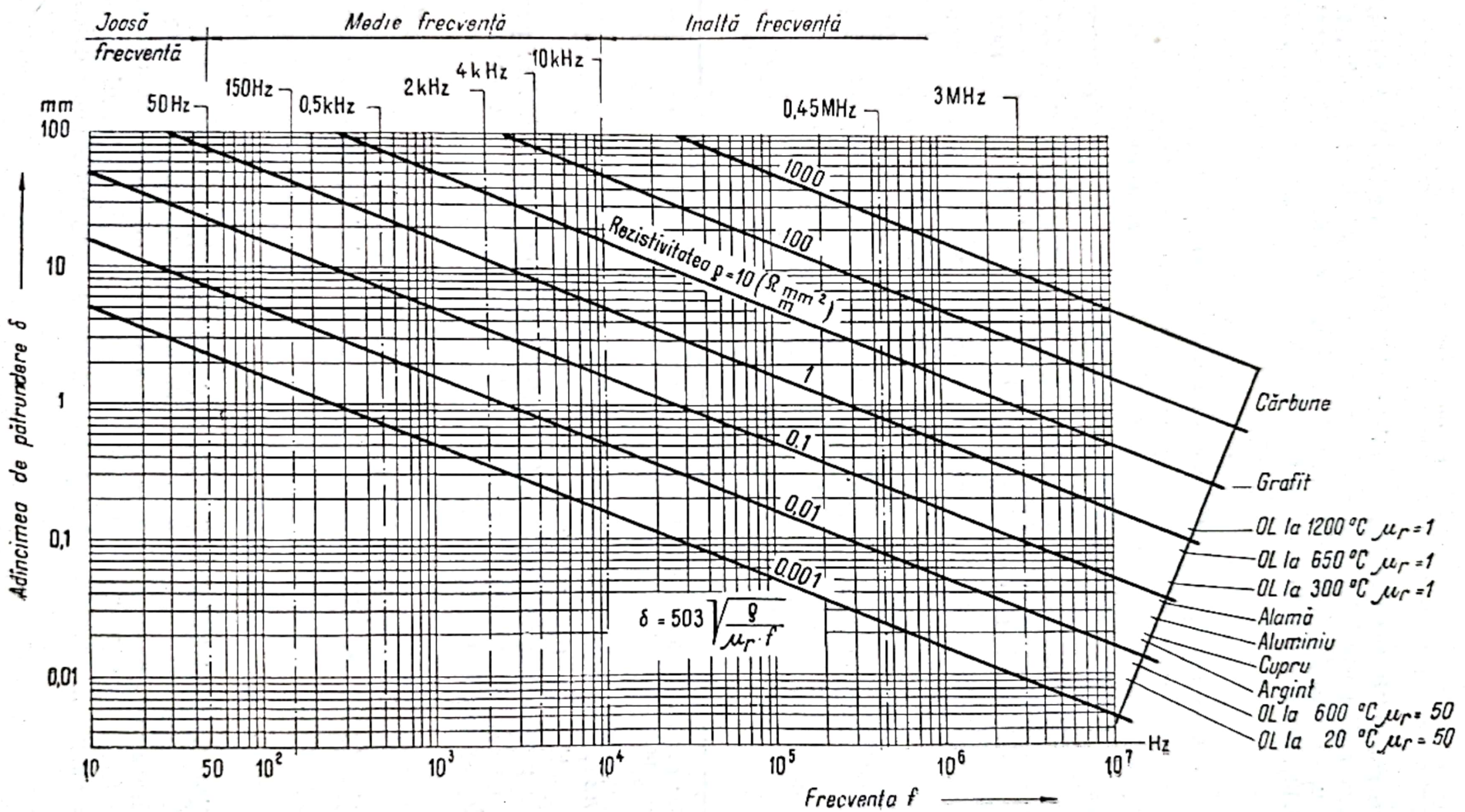


Fig. 3.48. Adîncimea de pătrundere δ în funcție de frecvența f pentru diferite materiale.

Scanned with OKEN Scanner

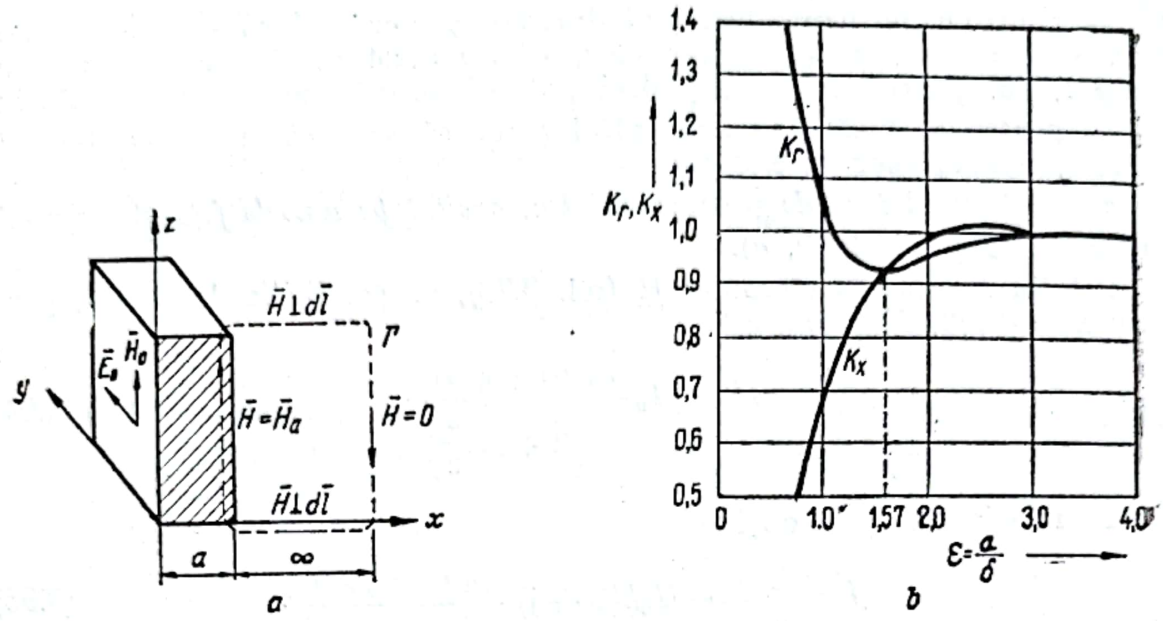


Fig. 3.49. Conductor plan de grosime finită excitat pe una din fețe (*a*); variația funcțiilor K_r și K_x (*b*).

conductorului; într-adevăr dacă $f \to 0$, $\varepsilon = a/\delta \to 0$ și $\delta \to \infty$, cînd în realitate adîncimea de pătrundere nu poate fi mai mare decît grosimea conductorului.

Înlocuind în relația (3.79) pe $\underline{H}$ (rel. 3.88) și $\underline{E}$ (rel. 3.89), se obține vectorul Poynting sub formă complexă

$$\underline{S} = H_0^2 k\rho \left[\frac{\operatorname{sh} 2k\ (a-x) + \sin 2k\ (a-x)}{\operatorname{ch} 2ka - \cos 2ka} + \mathrm{j}\frac{\operatorname{sh} 2k(a-x) - \sin 2k(a-x)}{\operatorname{ch} 2ka - \cos 2\ ka}\right]. \qquad (3.90)$$

Puterea absorbită de unitatea de suprafață a conductorului ($x = 0$) este

$$\underline{S}_0 = H_0^2 k\rho(K_r + \mathrm{j}K_x), \qquad (3.91)$$

în care

$$K_r = \frac{\operatorname{sh}2\varepsilon + \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch}2\varepsilon - \cos 2\varepsilon} \quad \text{și} \quad K_x = \frac{\operatorname{sh} 2\varepsilon - \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch} 2\varepsilon - \cos 2\varepsilon} \qquad (3.92)$$

sînt funcții a căror variație cu ε este indicată în figura 3.49, *b*.

Factorul de putere este

$$\cos\varphi = \frac{S_{a_0}}{\sqrt{S_{a_0}^2 + S_{r_0}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_x}{K_r}\right)^2}}. \qquad (3.93)$$

Din figura 3.49 se observă următoarele

— pentru $\varepsilon \geqslant 3$, $K_r = K_x = 1$ și vectorul Poynting are aceeași valoare ca și în cazul semispațiului conductor (rel. 3.81);

Scanned with OKEN Scanner

— pentru ca încălzirea bobinei inductoare şi a ecranelor magnetice să fie cît mai redusă, este necesar ca grosimea acestora să satisfacă relaţia $a \geqslant 1{,}57\delta$, pentru care K_r şi deci puterea activă, au valoare minimă;

— pentru ca încălzirea unei plăci plane să se facă cu un randament mărit, este necesar ca $\varepsilon \leqslant 1{,}57$.

c. Conductorul plan de grosime finită a, excitat pe ambele feţe, de cîmpul magnetic $\bar{H}_0$ (fig. 3.50, *a*).

Soluţia generală a cîmpului $\underline{H}$ (rel. 3.73), cu condiţiile la limită, pentru $x = \pm a/2$, $\underline{H} = \underline{H}_0$, este

$$\underline{H} = \underline{H}_0 \frac{\operatorname{ch}\,[(1+\mathrm{j})kx]}{\operatorname{ch}\left[(1+\mathrm{j})k\frac{a}{2}\right]}. \tag{3.94}$$

Cu relaţia (3.76) se obţine

$$\underline{J} = \frac{\underline{E}}{\rho} = -\underline{H}_0 k(1+\mathrm{j}) \frac{\operatorname{sh}\,[(1+\mathrm{j})kx]}{\operatorname{ch}\left[(1+\mathrm{j})k\frac{a}{2}\right]}. \tag{3.95}$$

Notînd cu $\varepsilon = a/\delta$ — adîncimea relativă de pătrundere, puterea absorbită de unitatea de suprafaţă a conductorului ($x = a/2$) este

$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \cdot \underline{H}_0^* = H_0 k\rho(K_r + \mathrm{j}K_x), \tag{3.96}$$

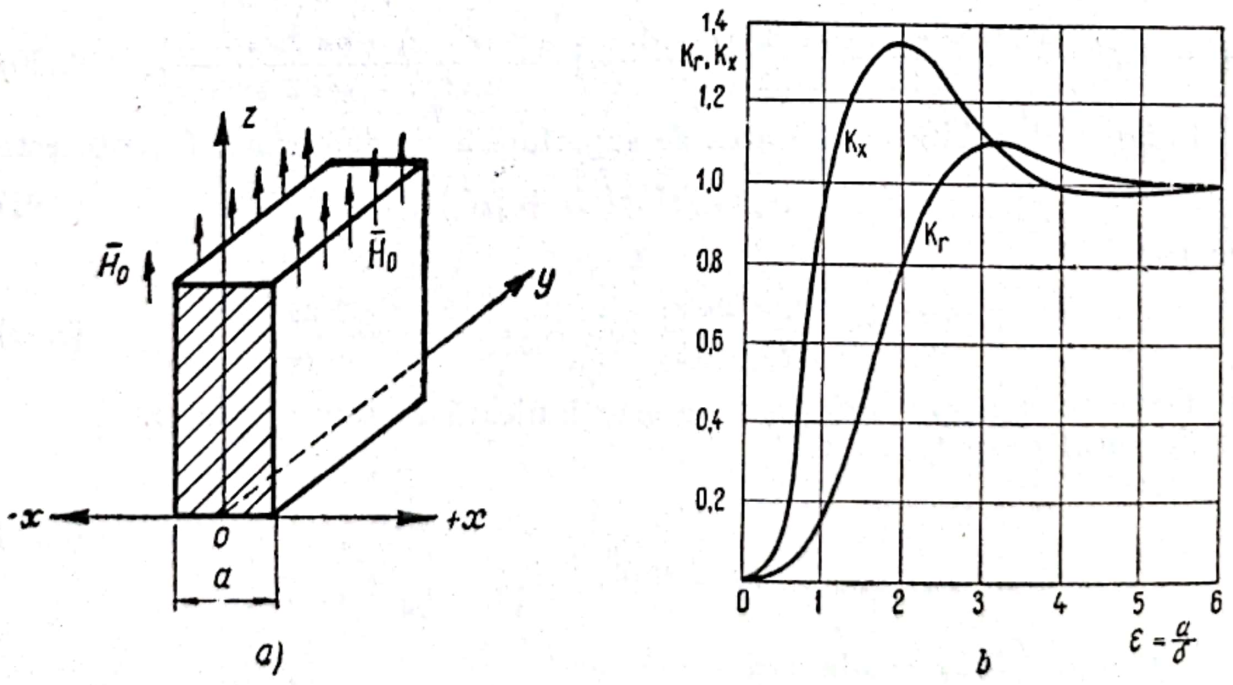


Fig. 3.50. Conductor plan de grosime finită, excitat pe ambele feţe (*a*); variaţia funcţiilor K_r şi K_x (*b*).

în care funcțiile

$$K_r = \frac{\mathrm{sh}\,\varepsilon - \sin\varepsilon}{\mathrm{ch}\,\varepsilon + \cos\varepsilon} \quad \text{și} \quad K_x = \frac{\mathrm{sh}\,\varepsilon + \sin\varepsilon}{\mathrm{ch}\,\varepsilon + \cos\varepsilon}, \tag{3.97}$$

au variația indicată în figura 3.50, *b*; se observă că pentru $\varepsilon \geqslant 6$, $K_r = K_x = 1$ și vectorul Poynting are aceeași expresie ca și în cazul semispațiului conductor (rel. 3.81).

3.3.2. Repartizarea curenților turbionari în conductoare cilindrice

Considerăm un conductor cilindric de rază r_e și lungimea infinită, la suprafața căruia este stabilit un cîmp magnetic $\bar{H}_0$, orientat după axa Oz, cu variație sinusoidală în timp (fig. 3.51, *a*); în figură s-au utilizat coordonatele cilindrice r, φ și z.

Datorită caracterului omogen și izotrop al materialului cilindrului și a uniformității cîmpului magnetic la suprafață, toate mărimile de stare locală a cîmpului electromagnetic sînt funcțiuni numai de coordonata r și de timpul t, adică în interiorul cilindrului $\bar{H} = \bar{H}(r, t)$, $\bar{E} = \bar{E}(r, t)$, $\bar{J} = \bar{J}(r, t)$.

Exprimînd operatorul laplacean în coordonate cilindrice în ecuația (3.65) pe care o satisface vectorul $\bar{H}$ în interiorul cilindrului, se obține

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial H(r,t)}{\partial r}\right] = \mu\sigma\frac{\partial H(r,t)}{\partial t}. \tag{3.98}$$

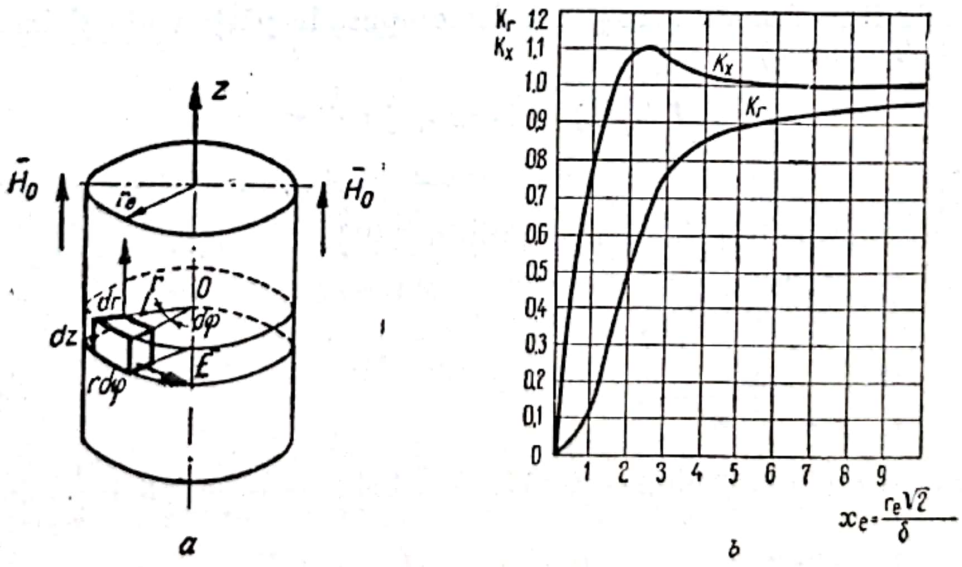


Fig. 3.51. Conductor cilindric plin (*a*); variația funcțiilor K_r și K_x(*b*).

În regim permanent sinusoidal, această ecuaţie se reprezintă în complex simplificat sub forma

$$\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}\underline{H}}{\mathrm{d}r}\right) = \mathrm{j}\omega\mu\sigma\underline{H}, \tag{3.99}$$

astfel că

$$H(r,\ t) = \mathrm{Im}\{\sqrt{2}\underline{H}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\}. \tag{3.100}$$

Derivînd în relaţia (3.99) şi introducînd variabila complexă

$$\underline{z} = r\underline{p}, \tag{3.101}$$

în care $\underline{p} = \sqrt{\mathrm{j}\omega\mu\sigma}$, se obţine

$$\frac{\mathrm{d}^2\underline{H}}{\mathrm{d}\underline{z}^2} + \frac{1}{\underline{z}}\frac{\mathrm{d}\underline{H}}{\mathrm{d}\underline{z}} - \underline{H} = 0, \tag{3.102}$$

o formă specială a ecuaţiei de tip Bessel, în care variabila $\underline{z}$ este complexă.

Notînd $x = r\sqrt{2}/\delta = rk\sqrt{2}$, variabila $\underline{z}$ devine

$$\underline{z} = \sqrt{\mathrm{j}}\,\frac{r\sqrt{2}}{\delta} = \sqrt{\mathrm{j}}x; \tag{3.103}$$

soluţia generală a ecuaţiei (3.102) este

$$\underline{H} = \underline{A}\cdot I_0(\sqrt{\mathrm{j}}x) + \underline{B}\cdot K_0(\sqrt{\mathrm{j}}x), \tag{3.104}$$

în care:

$I_0(\sqrt{\mathrm{j}}x)$ este funcţia Bessel modificată, de ordinul zero, speţa I;
$K_0(\sqrt{\mathrm{j}}x)$ — funcţia Bessel modificată de ordinul zero, speţa II;
$\underline{A}$, $\underline{B}$ — constante complexe arbitrare.

Funcţiile Bessel modificate pot fi descompuse în părţi reale şi imaginare (funcţiile Thomson):

$$I_0(\sqrt{\mathrm{j}}x) = \mathrm{ber}\,x + \mathrm{j}\,\mathrm{bei}\,x$$
$$K_0(\sqrt{\mathrm{j}}x) = \mathrm{ker}\,x + \mathrm{j}\,\mathrm{kei}\,x, \tag{3.105}$$

care pot fi exprimate prin şirurile infinite [49]:

$$\mathrm{ber}\,x = 1 - \frac{x^4}{(2\cdot 4)^2} + \frac{x^8}{(2\cdot 4\cdot 6\cdot 8)^2} + \ldots$$

$$\mathrm{bei}\,x = \frac{x^2}{2^2} - \frac{x^6}{(2\cdot 4\cdot 6)^2} + \ldots \tag{3.106}$$

$$\mathrm{ker}\,x = \mathrm{ber}\,x(\ln 2 - \ln x - 0{,}577) + \frac{\pi}{4}\mathrm{bei}\,x - \frac{x^4}{(2\cdot 4)^2}\left(1 + \frac{1}{2}\right) + \ldots$$

$$\mathrm{kei}\,x = \mathrm{bei}\,x(\ln 2 - \ln x - 0{,}577) - \frac{\pi}{4}\mathrm{ber}\,x + \frac{x^2}{2^2} + \ldots$$

Scanned with OKEN Scanner

Intensitatea cîmpului electric $\overline{E}$ rezultă din prima ecuație a lui Maxwell (rel. 3.63); deoarece cîmpul $\overline{H}$ este orientat după axa *oz*, singurele componente nenule ale rot $\overline{H}$, și deci ale vectorului $\overline{E}$, sînt cele tangențiale

$$E(r, t) = E_\varphi = -\rho \frac{\partial H(r, t)}{\partial r}, \tag{3.107}$$

adică, în complex

$$\underline{E} = -\rho \frac{\mathrm{d}\underline{H}}{\mathrm{d}r}. \tag{3.108}$$

Deoarece $\mathrm{d}r = 1/k\sqrt{2} \cdot \mathrm{d}x$ (rel. 3.103), rezultă

$$\underline{E} = -\sqrt{2}\rho k \frac{\mathrm{d}\underline{H}}{\mathrm{d}x}. \tag{3.109}$$

În cele ce urmează se vor determina puterile dezvoltate în conductoarele cilindrice întîlnite la încălzirea prin inducție.

a. Conductorul cilindric plin (fig. 3.51, *a*). *Condițiile la limită* pentru cîmpul magnetic exprimat de relația (3.104) sînt:

— pentru $r = 0$ $(x = 0)$, funcțiile $I_0(\sqrt{\mathrm{j}}\, x) = 1$ și $K_0(\sqrt{\mathrm{j}}\, x) = \infty$, și deci $\underline{B} = 0$, deoarece cîmpul magnetic are valoarea finită în axul cilindrului;

— pentru $r = r_e (x = x_e)$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ și $\underline{A} = \underline{H}_0 / I_0(\sqrt{\mathrm{j}}\, x_e)$.

Cîmpul magnetic are deci expresia

$$\underline{H} = \underline{H}_0 \frac{I_0(\sqrt{\mathrm{j}}\, x)}{I_0(\sqrt{\mathrm{j}}\, x_e)} = \underline{H} \frac{\mathrm{ber}\, x + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x}{\mathrm{ber}\, x_e + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x_e}, \tag{3.110}$$

iar din relația (3.109) rezultă densitatea de curent și cîmpul electric

$$\underline{J} = \sigma \underline{E} = -\underline{H}_0 k \sqrt{2} \frac{\mathrm{ber}' x + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}' x}{\mathrm{ber}\, x_e + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x_e}. \tag{3.111}$$

Relațiile (3.110) și (3.111) indică dependența mărimilor de stare ale cîmpului electromagnetic în cilindrul plin, de frecvența cîmpului inductor și de raza cilindrului, deoarece $x_e = r_e \sqrt{2}/\delta$.

Înlocuind aceste relații în expresia vectorului Poynting (rel. 3.79) obținem

$$\underline{S} = \underline{E} \cdot \underline{H}^* = -H_0^2 k \rho \sqrt{2} \left[\frac{\mathrm{ber}' x + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}' x}{\mathrm{ber}\, x_e + \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x_e} \cdot \frac{\mathrm{ber}\, x - \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x}{\mathrm{ber}\, x_e - \mathrm{j}\, \mathrm{bei}\, x_e} \right]; \tag{3.112}$$

semnul minus se referă la faptul că vectorul $\overline{S}$, este dirijat în sens contrar variabilei r, deci este orientat spre interiorul cilindrului.

Puterea absorbită de unitatea de suprafață a cilindrului ($x = x_e$ în relația 3.112) este

$$\underline{S}_0 = H_0^2 k \rho (K_r + \mathrm{j} K_x) = S_{a_0} + \mathrm{j} S_{r_0}, \tag{3.113}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care funcţiile

$$K_r = \sqrt{2}\,\frac{\text{ber}\,x_e \cdot \text{ber}'x_e + \text{bei}\,x_e \cdot \text{bei}'x_e}{(\text{ber}\,x_e)^2 + (\text{bei}\,x_e)^2} \tag{3.114}$$

şi

$$K_x = \sqrt{2}\,\frac{\text{ber}\,x_e \cdot \text{bei}'\,x_e - \text{bei}\,x_e \cdot \text{ber}'\,x_e}{(\text{ber}\,x_e)^2 + (\text{bei}\,x_e)^2}$$

au variaţia indicată în figura 3.51, *b*.

Din figură se observă următoarele:

— pentru $x_e = r_e\sqrt{2}/\delta \geqslant 10$, $K_r = K_x = 1$ şi vectorul Poynting are aceeaşi valoare ca şi în cazul semispaţiului conductor (relaţia 3.81);

— pentru ca piesa cilindrică să poată fi încălzită este necesar ca $x_e = r_e\sqrt{2}/\delta \geqslant 4$, ceea ce înseamnă că frecvenţa de lucru trebuie aleasă în funcţie de diametrul piesei.

La suprafaţa cilindrului, cîmpul $\underline{E}$ are valoarea

$$\underline{E}_0 = -\underline{H}_0 k\rho(K_r + jK_x). \tag{3.115}$$

b) Conductorul cilindric gol excitat în exterior de cîmpul magnetic $\overline{H}_0$ (fig. 3.52, *a*).

Cîmpul $\overline{H}$ în conductor este dat de relaţia (3.104) cu *condiţiile la limită*: pentru $r = r_e(x = x_e)$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ şi pentru $r = r_i(x = x_i)$, $\underline{H} = \underline{H}_i$, adică

$$\begin{aligned}\underline{H}_0 &= \underline{A}I_0(\sqrt{j}\,x_e) + \underline{B}K_0(\sqrt{j}\,x_e)\\ \underline{H}_i &= \underline{A}I_0(\sqrt{j}\,x_i) + \underline{B}K_0(\sqrt{j}\,x_i),\end{aligned} \tag{3.116}$$

în care $x_e = r_e\sqrt{2}/\delta$ şi $x_i = r_i\sqrt{2}/\delta$, r_e şi r_i fiind raza exterioară, respectiv interioară a cilindrului gol.

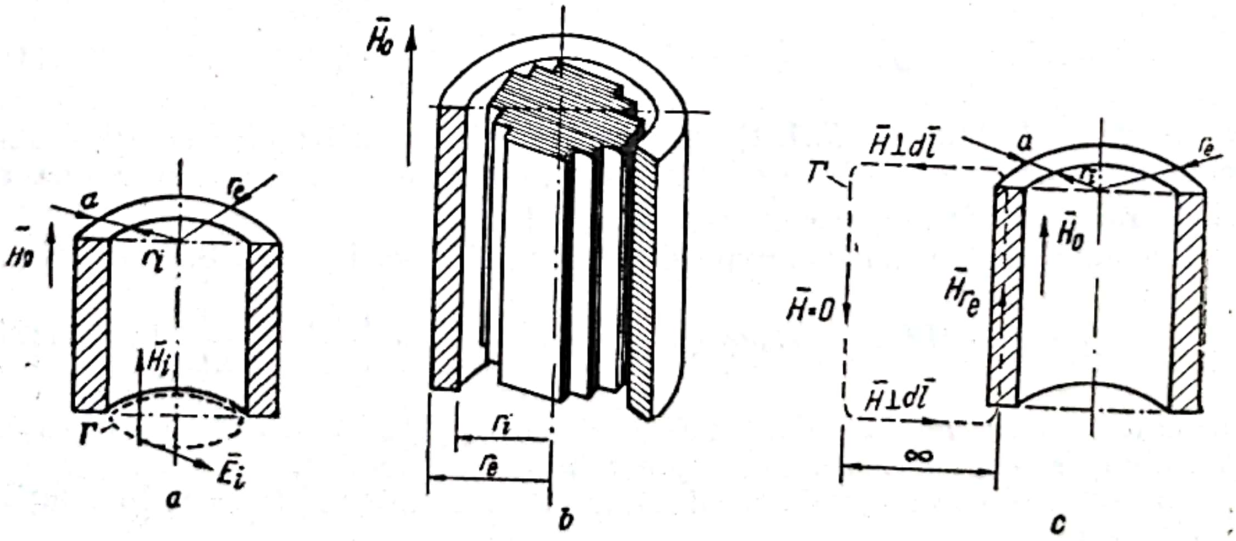


Fig. 3.52. Conductor cilindric gol:

a — excitat în exterior; *b* — cu miez feromagnetic în interior; *c* — excitat în interior.

Cîmpul magnetic $\overline{H}_i$ pe suprafața interioară a cilindrului gol se determină aplicînd legea inducției electromagnetice pe conturul Γ din figura 3.52, *a*,

$$-2\pi r_i \underline{E}_i = j\omega \underline{\Phi}_i = j\omega\pi r_i^2 \mu_0 \underline{H}_i \tag{3.117}$$

și utilizînd relația (3.109)

$$\underline{E}_i = -\sqrt{2}k\rho \left(\frac{d\underline{H}}{dx}\right)_{r=r_i}; \tag{3.118}$$

eliminînd cîmpul $\underline{E}_i$ între cele două ecuații, se va obține $\underline{H}_i$. Calculele se complică, conducînd la funcțiile Bessel modificate de ordinul 1, speța I și II [50].

Puterea absorbită pe unitatea de suprafață exterioară a cilindrului gol se poate pune sub forma cunoscută

$$\underline{S}_0 = H_0^2 k\rho(K_r + jK_x), \tag{3.119}$$

în care funcțiile K_r și K_x depind de x_e și x_i. Pentru $x_i \geqslant 10$, funcțiile K_r și K_x au aceeași variație ca și în cazul conductorului plan de grosime finită ($a = r_e - r_i$) excitat pe una din fețe (rel. 3.92 și fig. 3.49, *b*).

c) Conductorul cilindric gol cu miez feromagnetic în interior (fig. 3.52, *b*). *Condițiile la limită* pentru cîmpul $\overline{H}$ (rel. 3.104) sînt: pentru $r = r_e (x = x_e)$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ și pentru $r = r_i (x = x_i)$ $\underline{H} = 0$ (expresia cîmpului magnetic pe suprafața interioară a cilindrului, din relațiile (3.117) și (3.118) este

$$\underline{H}_i = \frac{2\sqrt{2}k\rho}{j\omega\mu_0\mu_r' r_i}\left(\frac{d\underline{H}}{dx}\right)_{r=r_i},$$

în care μ_r' este permeabilitatea magnetică relativă a miezului feromagnetic, cu valoare foarte mare, ceea ce conduce la $\underline{H}_i \backsimeq 0$).

Pentru puterea absorbită pe unitatea de suprafață exterioară a cilindrului, în cazul în care $x_i \geqslant 10$, se poate utiliza relația (3.119) și figura 3.49,*b*.

d) Conductorul cilindric gol excitat în interior de cîmpul magnetic $\overline{H}_0$ (fig. 3.52, *c*).

În acest caz, *condițiile la limită* pentru cîmpul magnetic (rel. 3.104) sînt: pentru $r = r_i (x = x_i)$, $\underline{H} = \underline{H}_0$ și pentru $r = r_e (x = x_e)$, $\underline{H} = 0$ (legea circuitului magnetic aplicată pe conturul Γ dă $\underline{H} = \underline{H}_e = \Sigma \underline{I} = 0$).

Și în acest caz, pentru $x_i \geqslant 10$, puterea absorbită pe unitatea de suprafață interioară a cilindrului este dată de relația (3.119) și figura 3.49, *b*, de la conductorul plan de grosime finită excitat pe una din fețe.

3.3.3. Transmiterea energiei electromagnetice între inductor și piesă

Constantele de material, formele și pozițiile reciproce diferite ale inductoarelor și pieselor încălzite influențează în mare măsură transmiterea energiei electromagnetice. În cele ce urmează va fi expus cazul cel mai des întîlnit, al inductorului solenoidal în interiorul căruia este introdusă o piesă cilindrică.

Scanned with OKEN Scanner

IMPEDANȚA INDUCTORULUI ȘI A PIESEI

a. **Inductorul solenoidal de lungime infinită, avînd în interior o piesă de lungime finită** *h*. Inductorul solenoidal avînd N spire și dimensiunile din figura 3.53, alimentat la tensiunea U, va fi parcurs de curentul I_1, care produce cîmpul magnetic $\overline{H}_0$ în spațiul de aer dintre inductor și piesă; inductorul reprezintă într-o primă aproximație un conductor cilindric gol excitat în interior, iar piesa — un conductor cilindric plin.

Mărimile și parametrii inductorului vor fi notați cu indicele *1*, iar cele referitoare la piesă cu indicele *2*.

Puterea aparentă care pătrunde în inductor este dată de vectorul lui Poynting (rel. 3.91) înmulțit cu suprafața

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_0 \pi d_1 h = H_0^2 k_1 \rho_1 (K_{r_1} + jK_{x_1}) \pi d_1 h, \tag{3.120}$$

în care

$$\underline{H}_0 = \frac{N\underline{I}_1}{h}. \tag{3.121}$$

Partea reală a puterii aparente $\underline{S}_1$ reprezintă puterea activă dezvoltată în inductor, iar partea imaginară — puterea reactivă.

Înlocuind pe $\underline{H}_0$ din relația (3.121) în (3.120) se obține

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = R_1 I_1^2 + jX_1 I_1^2, \tag{3.122}$$

în care

$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h} N^2 K_{r_1} = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 b} N K_{r_1}$ este rezistența inductorului;

$X_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h} N^2 K_{x_1}$ — reactanța interioară a inductorului.

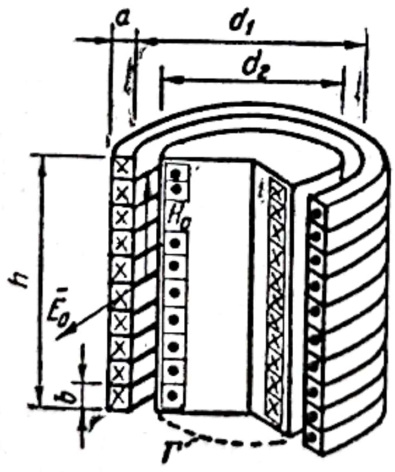


Fig. 3.53. Piesă cilindrică în interiorul unui inductor solenoidal.

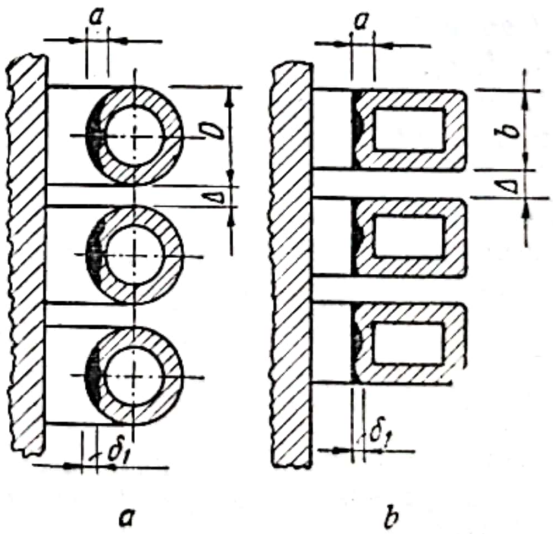


Fig. 3.54. Repartiția curentului în inductorul cu:
a — spire cilindrice; *b* — spire dreptunghiulare.

Curentul este repartizat pe adîncimea de pătrundere δ_1 în spirele sub formă de țeavă ale inductorului (fig. 3.54).

Luînd în considerare distanța dintre spire, relațiile (3.123) devin:

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h_1 g} N^2 K_{r_1}, \tag{3.124}$$

$$X_1 = R_1 \frac{K_{x_1}}{K_{r_1}}, \tag{3.125}$$

în care

g este factorul de umplere avînd valoarea

$g = \frac{bN}{h_1}$ — pentru spire dreptunghiulare;

$g = \frac{\pi DN}{4h_1}$ — spire cilindrice. (3.126)

Considerînd sistemul inductor-piesă ca un transformator monofazat fără miez feromagnetic, tensiunea aplicată inductorului este

$$\underline{U} = (R_1 + jX_1)\underline{I}_1 + N\frac{d\underline{\Phi}}{dt}, \tag{3.127}$$

în care fluxul magnetic $\underline{\Phi}$ din interiorul solenoidului reprezintă suma fluxurilor prin aer $\underline{\Phi}_a$ și prin piesă $\underline{\Phi}_p$

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_p. \tag{3.128}$$

Fluxul magnetic prin aer este

$$\underline{\Phi}_a = \mu_0 \underline{H}_0 \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4}; \tag{3.129}$$

înlocuind pe $\underline{H}_0$ din relația (3.121) se obține

$$\underline{\Phi}_a = \mu_0 N \underline{I}_1 \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4h}. \tag{3.130}$$

Fluxul magnetic prin piesă se obține din legea inducției electromagnetice aplicată pe conturul Γ:

$$\underline{E}_0 \pi d_2 = -j\omega \underline{\Phi}_p; \tag{3.131}$$

înlocuind pe $\underline{E}_0$ din relația (3.115) se obține

$$\underline{\Phi}_p = \frac{1}{j\omega} N \underline{I}_1 \rho_2 \frac{\pi d_2}{h\delta_2}(K_{r_2} + jK_{x_2}). \tag{3.132}$$

Scanned with OKEN Scanner

Impedanţa totală a sistemului inductor-piesă rezultă din relaţiile (3.127), (3.130) şi (3.132)

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}_1} = R_1 + jX_1 + N\frac{j\omega\underline{\Phi}}{\underline{I}_1} = R_1 + R_2' + j(X_1 + X_a' + X_2'), \quad (3.133)$$

în care

$$R_2' = N^2R_2 = N^2\rho_2\frac{\pi d_2}{h\delta_2}K_r \quad \text{este rezistenţa piesei raportată la inductor;} \quad (3.134)$$

$$X_2' = N^2X_2 = N^2R_2\frac{K_{x_2}}{K_r} \quad \text{— reactanţa interioară a piesei raportată la inductor;} \quad (3.135)$$

$$X_a' = N^2X_a = N^2\frac{\omega\mu_0\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4h} \quad \text{— reactanţa aerului dintre inductor şi piesă, raportată la inductor.} \quad (3.136)$$

b. **Inductorul solenoidal de lungime finită.** În această situaţie, cîmpul magnetic la capetele inductorului şi piesei va fi neuniform, ceea ce va modifica valoarea reactanţelor sistemului (fig. 3.65, *a*). Pentru a determina valoarea factorilor de corecţie ai parametrilor, se înlocuieşte sistemul inductor-piesă, cu un transformator fără miez magnetic, compus din doi cilindri coaxiali de grosime δ_1, respectiv δ_2, avînd dimensiunile din figura 3.55, *a*.

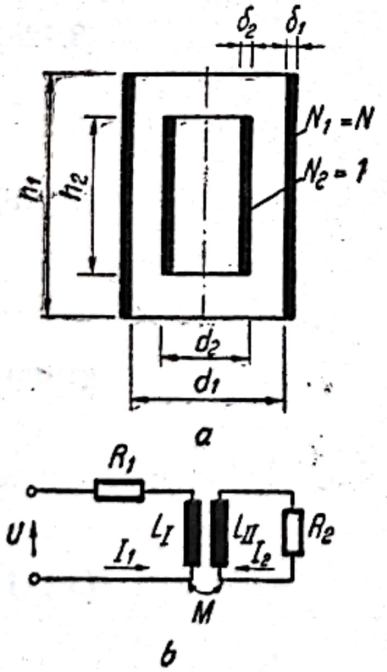


Fig. 3.55. Inductor de lungime finită:
a — transformator fără miez magnetic, *b* — schema electrică echivalentă.

Inductivităţile interioare ale cilindrilor fiind neglijabile datorită pereţilor subţiri, schema electrică echivalentă este cea din figura 3.55, *b*, în care L_I reprezintă inductivitatea exterioară a inductorului

$$L_I = \frac{N^2}{\dfrac{h}{\mu_0\dfrac{\pi d_1^2}{4}}}\alpha_1 = \mu_0\frac{\pi d_1^2}{4h_1}N^2\alpha_1, \quad (3.137)$$

iar L_{II} — inductivitatea exterioară a piesei

$$L_{II} = \frac{1}{\dfrac{h_2}{\mu_0\dfrac{\pi d_2^2}{4}}}\alpha_2 = \mu_0\frac{\pi d_2^2}{4h_2}\alpha_2. \quad (3.138)$$

În aceste relaţii $\alpha_1 = \alpha_1(d_1/h_1)$ şi $\alpha_2 = \alpha_2(d_2/h_2)$ sînt factori de corecţie ai inductivităţilor, factori ce ţin cont de lungimea finită a bobinei şi piesei; valoarea lor este dată în tabela 3.14.

Tabela 3.14

Factorul de corecție $\alpha = \alpha\left(\frac{d}{h}\right)$ [50]

$\frac{d}{h}$	α	$\frac{d}{h}$	α	$\frac{d}{h}$	α	$\frac{d}{h}$	α
0,0	1,0000	1,40	0,6115	4,20	0,3551	9,00	0,2185
0,05	0,9791	1,60	0,5795	4,40	0,3455	10,0	0,2033
0,10	0,9588	1,80	0,5511	4,60	0,3364	12,0	0,1790
0,20	0,9201	2,00	0,5255	4,80	0,3279	14,0	0,1605
0,30	0,8838	2,20	0,5025	5,00	0,3198	16,0	0,1457
0,40	0,8499	2,40	0,4816	5,20	0,3122	18,0	1,1336
0,50	0,8181	2,60	0,4626	5,60	0,2971	20,0	0,1236
0,60	0,7885	2,80	0,4452	6,00	0,2854	30,0	0,0910
0,70	0,7609	3,00	0,4292	6,40	0,2739	40,0	0,0722
0,80	0,7351	3,20	0,4145	6,80	0,2633	50,0	0,0611
0,90	0,7110	3,40	0,4008	7,00	0,2584	60,0	0,5228
1,00	0,6884	3,60	0,3882	7,40	0,2491	70,0	0,0467
1,10	0,6673	3,80	0,3764	7,80	0,2406	80,0	0,0419
1,20	0,6475	4,00	0,3654	8,00	0,2366	100,0	0,0350

Inductivitatea mutuală a sistemului inductor-piesă este

$$M = \frac{N}{\frac{h_2}{\mu_0 \frac{\pi d_2^2}{4}}} \alpha_M = N L_{II} \frac{\alpha_M}{\alpha_2}, \qquad (3.139)$$

în care $\alpha_M = \alpha_M(d_1/h_1,\ h_1/h_2)$ are valorile din tabela 3.15.

Tabela 3.15

Factorul de corecție $\alpha_M = \alpha_M\left(\frac{d_1}{h_1}, \frac{h_1}{h_2}\right)$ [50]

$\frac{d_1}{h_1}$	h_1/h_2									
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
0,00	1,000	0,910	0,834	0,770	0,715	0,667	0,625	0,572	0,500	0,400
0,05	0,975	0,904	0,829	0,768	0,713	0,667	0,624	0,570	0,499	0,399
0,10	0,950	0,890	0,821	0,761	0,707	0,661	0,620	0,568	0,496	0,397
0,20	0,895	0,850	0,793	0,737	0,690	0,646	0,607	0,557	0,487	0,391
0,30	0,840	0,811	0,757	0,709	0,664	0,622	0,585	0,539	0,474	0,381
0,40	0,820	0,770	0,721	0,675	0,632	0,598	0,564	0,517	0,455	0,368
0,50	0,782	0,733	0,687	0,644	0,604	0,570	0,538	0,494	0,436	0,354
0,60	0,745	0,696	0,654	0,615	0,577	0,543	0,512	0,470	0,418	0,335
0,70	0,712	0,665	0,621	0,584	0,548	0,517	0,487	0,447	0,397	0,320
0,80	0,678	0,633	0,585	0,560	0,519	0,492	0,463	0,424	0,378	0,304
0,90	,646	0,604	0,560	0,528	0,495	0,469	0,442	0,403	0,361	0,294
1,00	0,620	0,578	0,537	0,500	0,472	0,445	0,421	0,384	0,343	0,279

Scanned with OKEN Scanner

Ecuaţiile schemei echivalente din figura 3.55 b sînt

$$\underline{U} = (R_1 + j\omega L_I)\underline{I}_1 + j\omega M\underline{I}_2 \tag{3.140}$$

$$0 = j\omega M\underline{I}_1 + (R_2 + j\omega L_{II})\underline{I}_2 ;$$

eliminînd pe I_2 între cele două ecuaţii se obţine

$$\underline{U} = \underline{I}_1[R_1 + p^2R_2 + j\omega(L_I - p^2L_{II})], \tag{3.141}$$

în care

$$p^2 = \frac{(\omega M)^2}{R_2^2 + (\omega L_{II})^2} \tag{3.142}$$

este raportul de transformare al sistemului inductor-piesă.

Înlocuind pe M cu expresia (3.139), relaţia (3.142) devine

$$p^2 = N^2 \frac{\left(\frac{\alpha_M}{\alpha_2}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_2}{\omega L_{II}}\right)^2} = N^2\xi. \tag{3.143}$$

În cazul inductoarelor lungi $\alpha_M = \alpha_2 \simeq 1$ şi pentru $(\omega L_{II})^2 \gg R_2^2$ (situaţie des întîlnită în cazul frecvenţei înalte)

$$p^2 = N^2 ; \tag{3.144}$$

în cazul inductoarelor scurte, utilizate la călirea superficială, $\alpha_2 \simeq \alpha_M$ şi

$$p^2 \simeq \frac{N^2}{1 + \left(\frac{R^2}{\omega L_{II}}\right)^2} . \tag{3.145}$$

Impedanţa totală a sistemului inductor-piesă de lungime finită rezultă din relaţia (3.141)

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R_1 + p^2R_2 + j(X_I - p^2X_{II}). \tag{6.146}$$

Diferenţa $X_I - p^2X_{II}$ reprezintă reactanţa aerului dintre inductor şi piesă ; într-adevăr dacă se trece la inductorul de lungime infinită din care se ia o porţiune de lungime $h_1 = h_2 = h$, pentru care $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ şi $p^2 = N^2$,

$$X_I - p^2X_{II} = \omega\mu_0 \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4h} N^2 \equiv X_a' . \tag{3.147}$$

Scanned with OKEN Scanner

Expresia finală a impedanței totale a sistemului finit inductor-piesă este deci (cu rel. 3.133 și 3.146)

$$\underline{Z} = R_1 + p^2 R_2 + \mathrm{j}[X_1 + X_\mathrm{I} + p^2(X_2 - X_\mathrm{II})] = R + \mathrm{j}X, \quad (3.148)$$

în care R, X sînt rezistența totală, respectiv reactanța totală a sistemului.

Randamentul și factorul de putere al sistemului inductor-piesă

Randamentul electric η_e al sistemului inductor-piesă este raportul dintre puterea transformată în căldură în piesă

$$P_2 = R_2 I_2^2 = R_2 p^2 I_1^2 \quad (3.149)$$

și puterea absorbită de inductor

$$P = P_1 + P_2 = (R_1 + R_2 p^2) I_1^2, \quad (3.150)$$

adică

$$\eta_e = \frac{p^2 R_2}{R_1 + p^2 R_2} = \frac{p^2 R_2 / R_1}{1 + p^2 R_2 / R_1} = \frac{A}{1 + A}, \quad (3.151)$$

în care $A = p^2 R_2 / R_1$; dependența $\eta_e = \eta_e(A)$ este redată în figura 3,56, *a*.

Înlocuind în expresia lui A pe R_1 din relația (3.124), pe R_2 din relația (3.134) și p^2 din relația (3.144), rezultă

$$A = \frac{\rho_2 \delta_1}{\rho_1 \delta_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{K_{r_2}}{K_{r_1}} \cdot g. \quad (3.152)$$

Pentru ca randamentul electric să aibă o valoare ridicată, se impun următoarele condiții:

— $d_2 \simeq d_1$, adică distanța inductor-piesă trebuie să fie cît mai redusă;

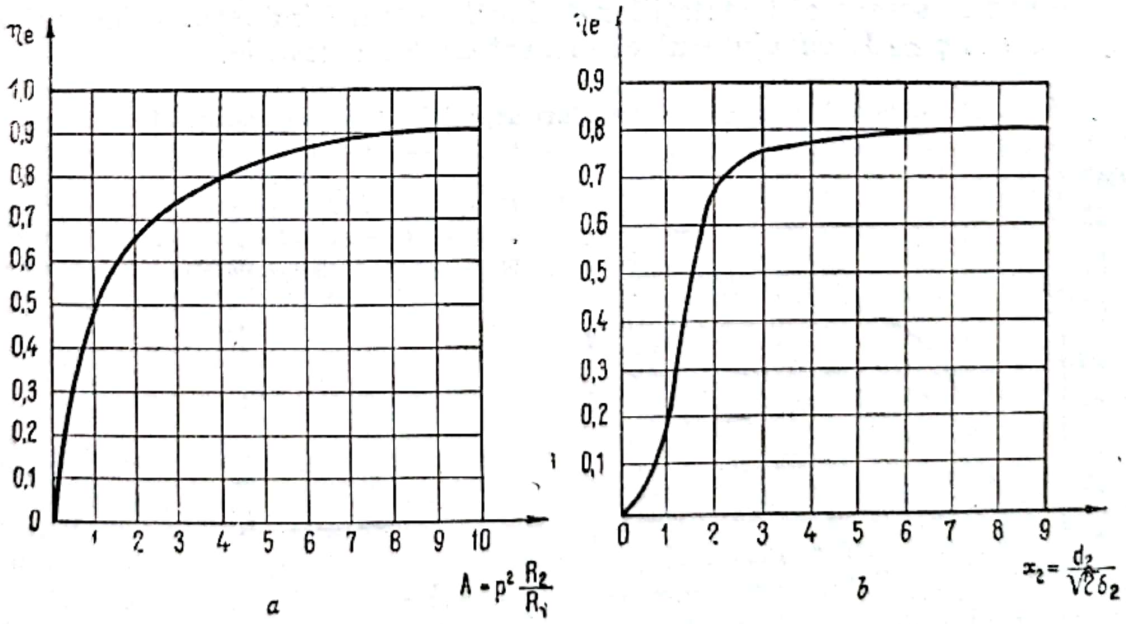


Fig. 3.56. Dependența $\eta_e = \eta_e(A)$ — *a*; $\eta_e = \eta_e(x_2)$ — *b*.

— $h_1 \geqslant h_2$, lungimea inductorului este necesar să o depăşească pe cea a piesei;

— factorul de umplere g al spirelor inductorului trebuie să fie cît mai mare;

— deoarece la proiectarea inductorului se alege $\varepsilon_1 = a_1/\delta_1 \geqslant 1{,}57$ (§ 3.3.1, *b*) pentru ca pierderile de putere să fie minime, rezultă proporţionalitatea lui A cu $K_{r_2} = K_{r_2}(x_2)$ şi deci creşterea randamentului electric cu mărirea frecvenţei figura 3.56, *b*, valorile mari pentru η_e corespunzînd raportului

$$\frac{d_2}{\sqrt{2}\,\delta_2} \geqslant 7; \tag{3.153}$$

— inductorul fiind executat din materiale neferomagnetice (cupru avînd $\mu_{r_1} = 1$) şi fiind răcit cu apă sau aer ($\rho_1 = \text{const.}$) rezultă proporţionalitatea

$$\frac{\rho_2 \delta_1}{\rho_1 \delta_2} \sim \sqrt{\rho_2 \mu_{r_2}}, \tag{3.154}$$

în care pentru δ_1 şi δ_2 a fost utilizată expresia (3.87). Pentru piesele neferomagnetice $\mu_{r_2} = 1$, astfel că $\eta_e \sim \sqrt{\rho_2}$, deci randamentul electric creşte cu temperatura; în cazul pieselor feromagnetice, deoarece ρ_2, creşte cu temperatura, iar μ_{r_2} scade la valoarea 1 la atingerea punctului Curie, randamentul electric va avea o variaţie importantă cu temperatura, micşorîndu-se brusc la temperatura corespunzătoare punctului Curie.

Factorul de putere al sistemului inductor-piesă

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}. \tag{3.155}$$

depinde de raportul diametrelor d_1/d_2 şi de $x_2 = d_2/\sqrt{2}\delta_2$ (fig. 3.57). Factorul de putere scăzut al instalaţiilor de încălzire prin inducţie se îmbunătăţeşte la $\cos\varphi \simeq 1$, cu ajutorul condensatoarelor derivaţie.

Fig. 3.57. Factorul de putere al sistemului inductor-piesă.

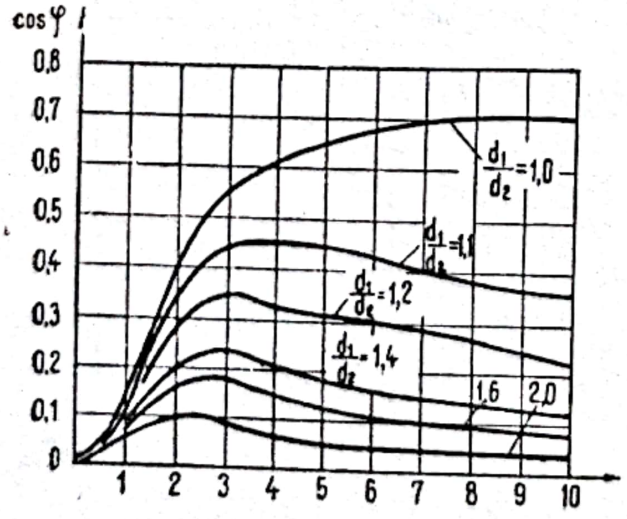
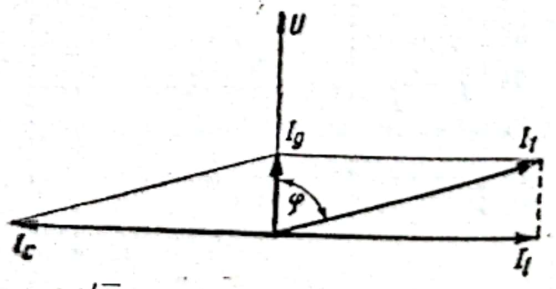


Fig. 3.58. Diagrama fazorială a compensării cuptorului de inducţie cu condensatoare derivaţie:

U — tensiunea de alimentare; I_g — curentul debitat de sursă; I_1 — curentul cuptorului; I_L — componenţa reactivă a curentului cuptorului; I_c — curentul condensatoarelor.



La rezonanță (fig. 3.58)

$$I_c = I_1 \sin \varphi, \tag{3.156}$$

adică

$$UC\omega = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}},$$

de unde capacitatea

$$C = \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2} \tag{3.157}$$

și puterea condensatoarelor

$$Q = \omega C U^2. \tag{3.158}$$

Bateria de condensatoare are capacitatea variabilă în trepte pentru a fi adaptată la variațiile inductivității cuptorului, în timpul încălzirii.

Condensatoarele permit utilizarea completă a puterii surselor de alimentare și contribuie la compensarea variațiilor de tensiune datorate sarcinii.

3.3.4. Sursele de alimentare ale instalațiilor de încălzire prin inducție

Sursele de alimentare se clasifică în surse de frecvență joasă, industrială, medie și înaltă.

Dintre sursele de joasă frecvență menționăm generatoarele sincrone rotite lent, generatoarele ionice și convertizoarele cu tiristoare.

Frecvența industrială se obține de la rețelele electrice de joasă sau înaltă tensiune ale întreprinderilor industriale, instalațiile electrotermice fiind conectate direct sau prin intermediul transformatoarelor sau autotransformatoarelor de forță.

Sursele de frecvențe medii și înalte sînt indicate în tabela 3.16. Alegerea tipului de generator se face pe baza randamentului generatorului, a frecvenței necesare pentru aplicația dată, ținînd cont de simplitatea, costul instalației și condițiile de întreținere, exploatare.

Multiplicatorul de frecvență cu miezuri feromagnetice se bazează pe armonicile de ordin impar ce apar în curentul bobinelor cu miez feromagnetic saturat.

Dintre multiplicatoare cel mai utilizat este triplorul de frecvență 3×50 Hz, schemele electrice conținînd trei bobine legate în stea (fig. 3.59, *a*) sau trei transformatoare monofazate (fig. 3.59, *b*).

Triplorul de frecvență cu bobine reprezintă un generator al armonicii de ordinul trei a *curentului*, datorită conexiunii stea a bobinelor *6* (armonicile de ordinul trei sînt homopolare) și saturării pronunțate a miezurilor feromagnetice; triplorul cu transformatoare reprezintă un generator al armonicii de ordinul trei a *tensiunii* datorită conexiunilor stea a înfășurări-

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.16

Caracteristicile principale ale surselor de alimentare a instalațiilor de încălzire prin inducție

Tipul generatorului	Gama de frecvențe Hz	Limitele puterii kW	Randamentul %
Multiplicator de frecvență cu miezuri feromagnetice	150...450	15...1000	80...95
Generator rotativ de medie frecvență	500...10000	15...1500	70...85
Generator ionic	500...3000	250...1000	90...95
Convertor de frecvență cu tiristoare	200...4000	15...1000	90...95
Generator electronic	50 000...1000 000	5...500	50...60

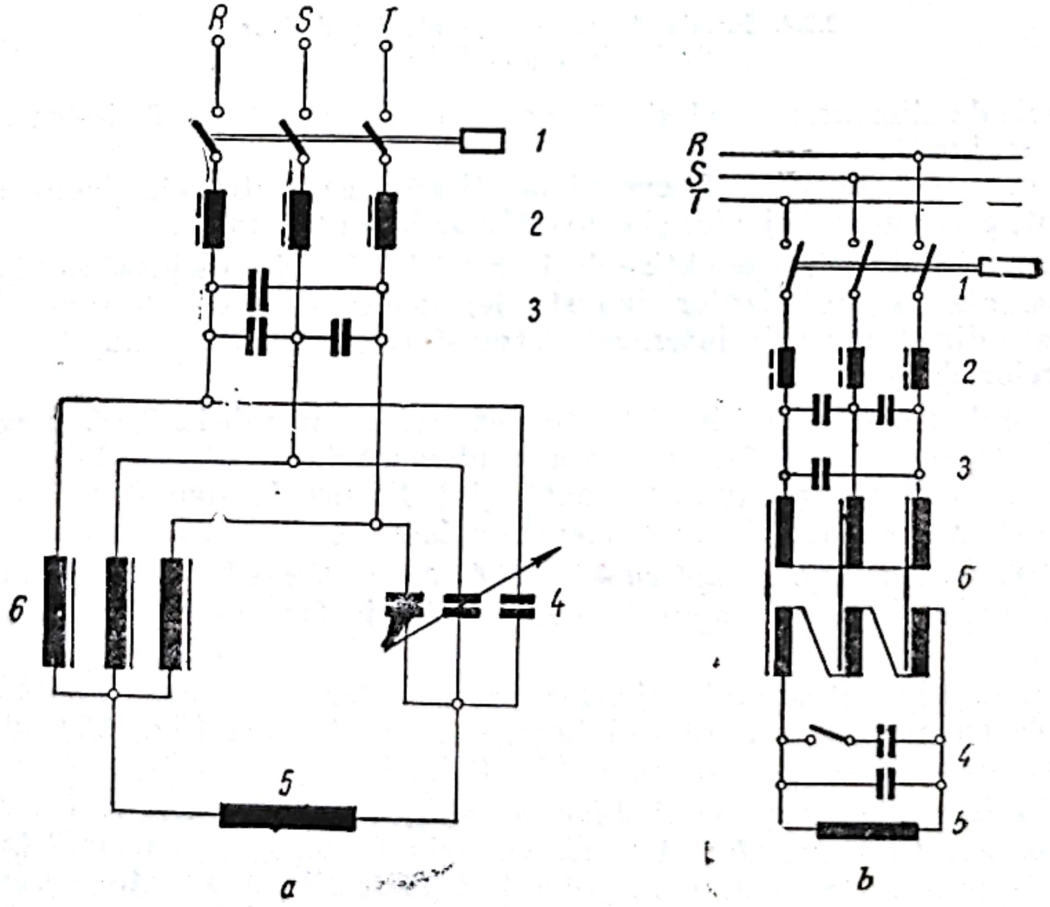


Fig. 3.59. Triplorul de frecvență:
a — cu bobine legate în stea; *b* — cu transformatoare monofazate.

Scanned with OKEN Scanner

lor primare și triunghi deschis a înfășurărilor secundare. Bobinele *2* cu miez feromagnetic și întrefier formează împreună cu condensatoarele *3* un filtru de absorbție al armonicilor superioare ale curentului triplorului; condensatoarele *3* servesc și la îmbunătățirea factorului de putere al instalației. Condensatoarele *4* compensează puterea reactivă absorbită de cuptorul *5*.

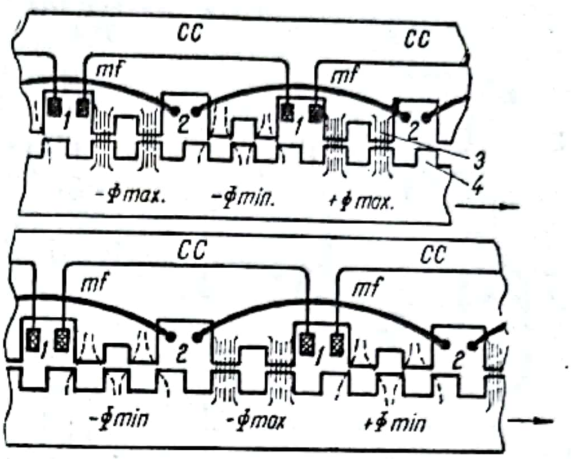


Fig. 3.60. Generatorul cu rotor nebobinat.

Saturarea puternică a miezurilor feromagnetice se obține prin mărirea tensiunii de alimentare sau printr-o magnetizare suplimentară în curent continuu, ceea ce implică utilizarea a cîte două bobine sau transformatoare pentru fiecare fază a triplorului.

Spre deosebire de triplorul cu bobine, cel cu transformatoare prezintă avantajul obținerii unei tensiuni de alimentare a cuptorului independente de tensiunea rețelei.

Generatorul rotativ de medie frecvență este un generator sincron monofazat cu: — rotor bobinat, avînd poli aparenți sau înecați, realizat pentru frecvențe pînă la 1 000 Hz; — rotor nebobinat (tip Lorenz-Schmidt), pentru frecvența 1 000 ... 10 000 Hz.

Generatorul cu rotor nebobinat este excitat de o înfășurare de curent continuu *CC* dispusă în crestăturile *1* ale statorului (fig. 3.60). Datorită variației reluctanței magnetice dintre dinții mici *3* ai statorului și *4* ai rotorului, fluxul magnetic variabil care trece prin înfășurarea de sarcină *mf* dispusă în crestăturile *2* ale statorului și cuprinzînd cîte două jumătăți de pol de semne contrarii, va induce în aceasta o tensiune electromotoare de frecvență

$$f = \frac{zn}{60},$$

în care z este numărul de dinți ai rotorului și n-viteza de rotație. Inductivitatea mare a generatorului se compensează cu condensatoare serie.

Generatorul cu rotor nebobinat tip GCF 2500—8000 Hz, construit de Uzina de Mașini Electrice București are puterea de 50...125 kW, tensiunea 750 V și un reglaj automat al tensiunii prin modificarea curentului de excitație [61].

Generatorul ionic (fig. 3.61) este un circuit invertor (curent continuu-curent alternativ), care folosește tuburile cu gaz (tiratroane, ignitroane) T_1 și T_2. Dispozitivul de comandă *DC* al grilelor asigură conducția și stingerea alternativă a tuburilor cu frecvența dorită; curentul i_1 va fi format dintr-o succesiune de impulsuri dreptunghiulare care induc în

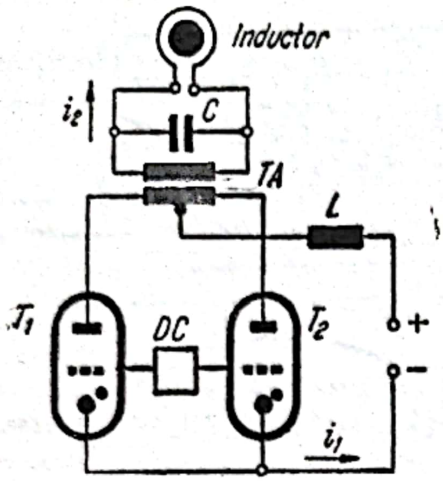
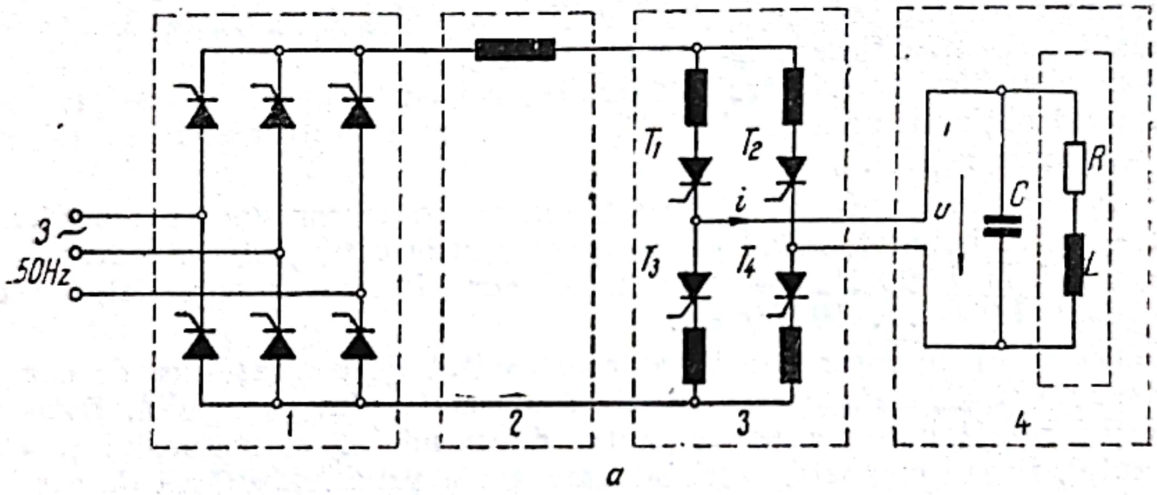


Fig. 3.61. Generatorul ionic cu tiratroane.

secundarul transformatorului de adaptare *TA* un curent alternativ i_2 de medie frecvenţă. Bobina *L* reprezintă un filtru pentru curentul de înaltă frecvenţă.

Convertorul de frecvenţă cu tiristoare (fig. 3.62, *a*) conţine redresorul comandat *1* care alimentează cu curent continuu invertorul *3* cu tiristoare conectate în punte, avînd rolul de a converti curentul continuu în curent alternativ de medie frecvenţă, care alimentează instalaţia de încălzire prin inducţie *4* (avînd rezistenţa *R* şi inductivitatea *L*); bobina *2* reprezintă un filtru de curent iar condensatorul *C* compensează factorul de putere al cuptorului.



a

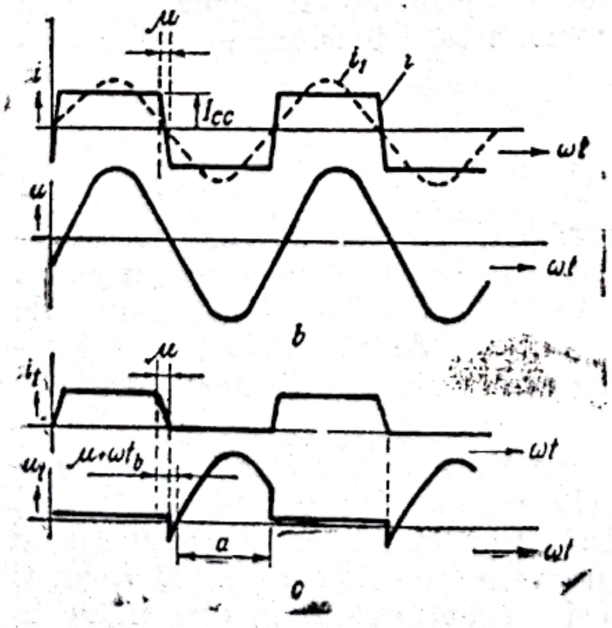


Fig. 3.62. Convertorul cu frecvenţă cu tiristoare:

a — schema electrică; *b* — curentul *i* şi tensiunea *u* de medie frecvenţă; *c* — curentul i_t şi tensiunea u_t a unui tiristor. I_{cc} — curent continuu; i_1 — fundamentala curentului *i*.

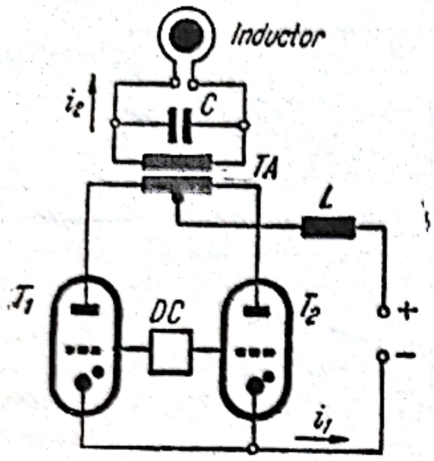
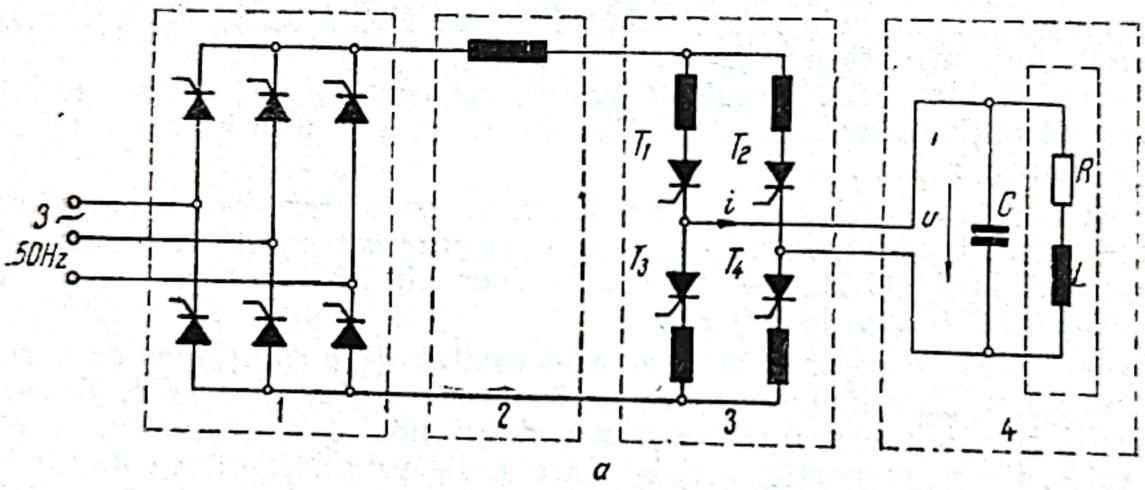


Fig. 3.61. Generatorul ionic cu tiratroane.

secundarul transformatorului de adaptare *TA* un curent alternativ i_2 de medie frecvenţă. Bobina *L* reprezintă un filtru pentru curentul de înaltă frecvenţă.

Convertorul de frecvenţă cu tiristoare (fig. 3.62, *a*) conţine redresorul comandat *1* care alimentează cu curent continuu invertorul *3* cu tiristoare conectate în punte, avînd rolul de a converti curentul continuu în curent alternativ de medie frecvenţă, care alimentează instalaţia de încălzire prin inducţie *4* (avînd rezistenţa *R* şi inductivitatea *L*); bobina *2* reprezintă un filtru de curent iar condensatorul *C* compensează factorul de putere al cuptorului.



a

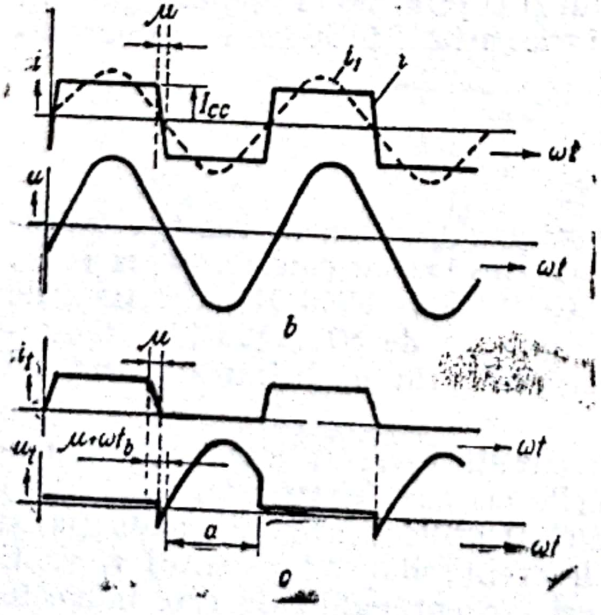


Fig. 3.62. Convertorul cu frecvenţă cu tiristoare:

a — schema electrică; *b* — curentul *i* şi tensiunea *u* de medie frecvenţă; *c* — curentul i_t şi tensiunea u_t a unui tiristor, I_{cc} — curent continuu; i_1 — fundamentala curentului *i*.

În figura 3,62, *b* este indicată variația în timp a curentului și tensiunii de medie frecvență.

Frecvența curentului i este determinată de frecvența impulsurilor de comandă a tiristoarelor, care depinde de frecvența proprie de rezonanță a circuitului oscilant $C-L$.

Prin aplicarea impulsului de comandă tiristoarelor T_1 și T_4, acestea trec în stare de conducție, sensul curentului prin sarcină fiind corespunzător semiperioadei pozitive; după o semiperioadă, prin aplicarea impulsului de comandă tiristoarelor T_2 și T_3 acestea vor trece în stare de conducție, curentul prin sarcină fiind cel corespunzător semiperioadei negative. Curentul prin T_1 și T_4 se anulează (fig. 3.62, *c*) datorită aplicării acestor tiristoare a unei tensiuni inverse de la condensatorul C, în momentul deblocării tiristoarelor T_2 și T_3. Timpul t de aplicare a tensiunii inverse (de blocare) trebuie să fie mai mare decît timpul de refacere t_r (30...70μs) a proprietăților de conducție a tiristorului; pentru realizarea acestei condiții trebuie să existe, între curentul i și tensiunea u, un defazaj capacitiv minim $\omega t_b + \mu/2$, în care μ este unghiul corespunzător timpului în care curentul tiristorului blocat se anulează, iar $t_b = (1, 2...2)t_r$.

Puterea condensatorului C este dată de relația $Q_c = Q + P \operatorname{tg} (\omega t_b + \mu/2)$, în care Q și P sînt puterile activă, respectiv reactivă a cuptorului.

După un unghi α, măsurat de la trecerea tensiunii condensatorului prin zero, tiristoarele blocate sînt din nou comandate. Unghiul α, numit unghi de comandă al invertorului, este

$$\alpha = \pi - \frac{2\pi}{T} t_b - \frac{\mu}{2},$$

T fiind perioada oscilațiilor proprii ale circuitului oscilant $C-L$.

Bobinele legate înaintea fiecărui tiristor au rolul de a limita panta de creștere a curentului la valoarea admisibilă (5...20 A/μs la 1 000 Hz) impusă de datele nominale ale tiristorului.

Deși au costul mai ridicat, convertoarele cu tiristoare tind să înlocuiască celelalte tipuri de generatoare de frecvență datorită posibilității de variație în limite largi a frecvenței, a compensării automate a factorului de putere, a randamentului ridicat și a siguranței mărite de funcționare.

Generatorul electronic este un oscilator cu autoexcitație utilizînd tuburi electronice (triode de putere 10 ... 100 kW) figura 3.63. Alimentarea osci-

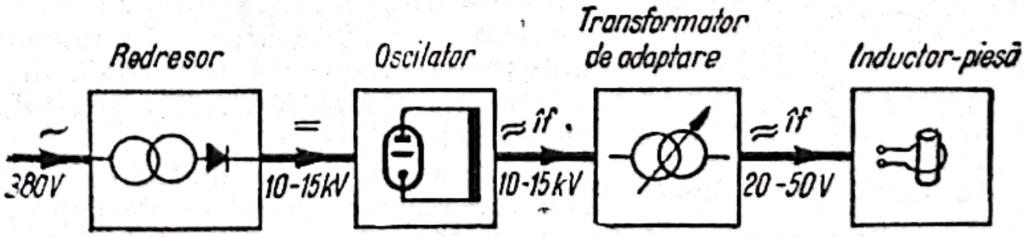


Fig. 3.63. Generatorul electronic.

latorului se face cu tensiunea continuă furnizată de un redresor de putere; transformatorul de adaptare este necesar pentru adaptarea sarcinii la generator (§ 3.3.12).

3.3.5. Cuptoare electrice de inducţie cu creuzet

Cuptoarele electrice cu creuzet (fără miez feromagnetic) sînt folosite la elaborarea oţelurilor de calitate superioară, a fontei, a metalelor şi aliajelor neferoase (aluminiu, cupru, nichel etc). Aceste tipuri de cuptoare prezintă următoarele avantaje:

— temperaturile ridicate se ating foarte repede, ceea ce permite topirea metalelor avînd temperatură înaltă de topire, cu o mare productivitate;

— amestec (agitaţie) intens al băii de metal sub acţiunea forţelor electrodinamice, ceea ce elimină supraîncălzirile locale şi reduce pierderile de metal;

— se obţin aliaje pure, topirea fiind posibilă în vid sau în atmosferă de protecţie;

— construcţie simplă, necesitînd spaţii relativ mici.

Dezavantajele cuptoarelor cu creuzet constau în antrenarea zgurei în şarjă şi în solicitarea mecanică puternică a căptuşelii creuzetului, datorită amestecului intens al băii de metal topit.

Cuptoarele cu creuzet pot fi de frecvenţă industrială (50Hz), medie (50...10 000 Hz) sau înaltă (50...400 kHz).

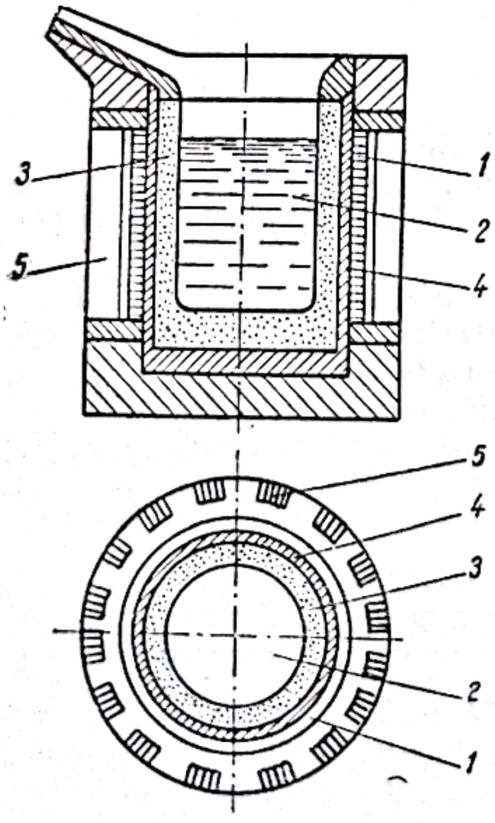


Fig. 3.64. Cuptorul cu creuzet.

Cuptorul cu creuzet (fig. 3.64) constă din inductorul *1* conectat la sursa de alimentare, care încălzeşte metalul topit *2* conţinut în creuzetul refractar *3*. Inductorul este construit din ţeavă de cupru (fig. 3.54) răcită cu apă; spirele sînt neizolate (fixate cu distanţoare) sau izolate cu bandă de sticlă, micanită. Între inductor şi creuzet se montează un cilindru *4* din carton de azbest pentru protecţia termică a inductorului. Creuzetul are căptuşeală acidă sau bazică, din material refractar, grafit sau material refractar cu rezistenţă mecanică mare în cazul topirii neferoaselor. Creuzetul este descoperit la cuptoarele de medie frecvenţă, la care agitaţia băii este mai puţin intensă, spre deosebire de cuptoarele de frecvenţă industrială la care, agitaţia fiind mai intensă, creuzetul este acoperit cu un capac.

Pentru a împiedica încălzirea elementelor constructive metalice ale cuptorului, aflate în cîmpul magnetic al inductorului, se prevăd ecrane din cupru (la frecvenţe

înalte) sau feromagnetice (la frecvențe medii) sub forma unor pachete de tole *5* așezate în jurul inductorului.

Cuptorul este prevăzut cu un dispozitiv hidraulic sau electromecanic pentru basculare în vederea golirii.

Efecte electrodinamice în baia de metal topit. Asupra curenților turbionari induși în șarjă (mii de amperi) aflați în cîmpul magnetic al inductorului (sute de Asp/cm) acționează forțe electrodinamice orientate de la suprafața laterală a băii spre interiorul acesteia, forțe care pun în mișcare (agită) baia de metal topit.

Presiunea electrodinamică maximă p_e apare în axul cilindrului care reprezintă șarja și este dată de relația [50]

$$p_e = \frac{I_2^2}{2h_2^2}\mu_2. \tag{3.159}$$

Datorită neuniformităților cîmpului magnetic la capetele inductorului, repartiția presiunilor va fi neuniformă (fig. 3.65, *a*), avînd ca rezultat agitația băii de metal topit (fig. 3.65, *b*). Ca urmare, la suprafața băii se va forma un menisc a cărui înălțime h_r — înălțime de ridicare — se determină din egalitatea presiunii electrodinamice maxime (rel. 3.159) cu presiunea hidrostatică a meniscului $p_h = \gamma \cdot h_r$, în care γ este greutatea specifică a metalului topit, rezultînd

$$h_r = \frac{I_2^2}{2h_2^2} \cdot \frac{\mu_2}{\gamma}, \tag{3.160}$$

sau raportată la înălțimea h_2 a băii de metal topit

$$h_r' = \frac{h_r}{h_2} \cdot 100\ [\%]. \tag{3.161}$$

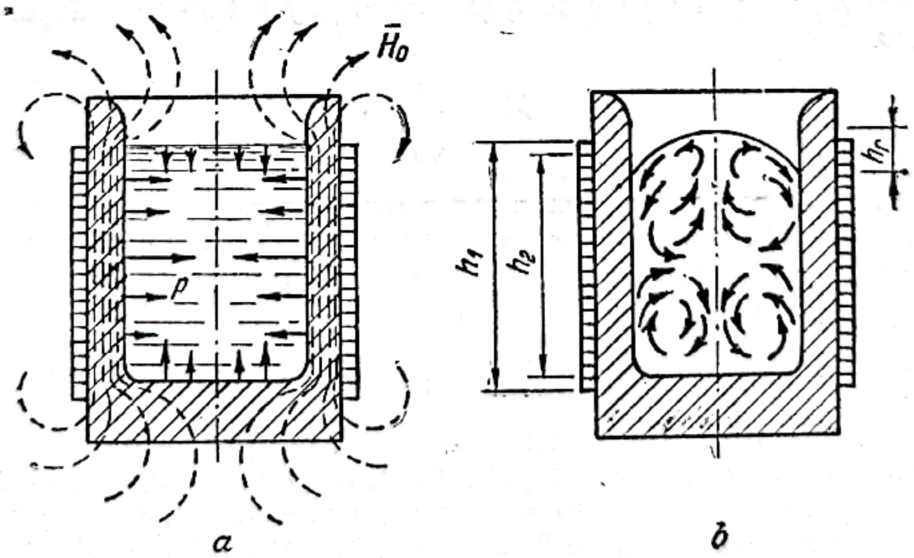


Fig. 3.65. Efecte electrodinamice în baia de metal topit:
a — repartiția presiunilor; *b* — agitația băii.

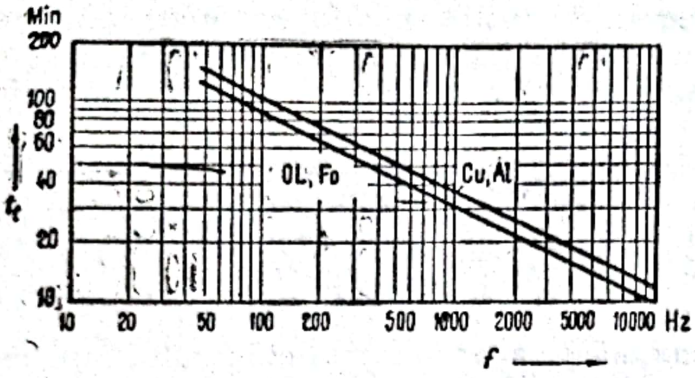


Fig. 3.66. Dependența timpului minim de topire de frecvență pentru o înălțime de ridicare admisibilă.

Efectele agitației băii de metal topit prezintă o serie de avantaje și anume:

— intensificarea reacțiilor chimice;

— uniformizarea temperaturilor în șarjă;

— arderea redusă a componentelor șarjei.

Dezavantajele menționate la începutul paragrafului pot fi limitate prin reducerea înălțimii de ridicare h'_r la o valoare maximă admisibilă de 8 ... 12%.

Deoarece puterea P_2 transformată în căldură în șarjă este

$$P_2 = R_2 I_2^2,$$

înlocuind pe I_2 din relația (3.160) și pe R_2 — relația (3.134), rezultă proporționalitatea puterii P_2 cu înălțimea de ridicare h'_r și frecvența f

$$P_2 = k_1 \cdot h'_r \cdot \sqrt{f}, \tag{3.162}$$

k_1 fiind o constantă; pe de altă parte din relațiile (3.2) (3.4) și (3.6) rezultă

$$P_2 = \frac{mi}{\eta_i t_t} = \frac{k_2}{t_t} \tag{3.163}$$

în care t_t este timpul de topire, k_2 — constantă.

Din egalarea relațiilor (3.162) și (3.163), rezultă legătura dintre înălțimea de ridicare h'_r, timpul de topire t_t și frecvența f a tensiunii de alimentare, sub forma

$$h'_r = \frac{k}{\sqrt{f}\, t_t} \cdot \tag{3.164}$$

Pentru a se menține înălțimea de ridicare în limite admisibile, este necesar ca între timpul de topire și frecvență să existe dependența dată de relația (3.164) — cu h'_r = constant — reprezentată în figura 3.66.

3.3.6. Calculul cuptoarelor electrice de inducție cu creuzet

La calculul cuptoarelor electrice cu creuzet se precizează caracteristicile metalului ce urmează a fi topit (tab. 3.13), mărimea bucăților solide ce formează încărcătura, capacitatea m (în kg), a cuptorului, regimul tehnologic necesar (temperatura de topire θ_t, de golire θ_g și timpul de topire t_t), condiții tehnologice speciale.

În cele ce urmează vor fi prezentate principalele etape de calcul.

Scanned with OKEN Scanner

a. **Dimensionarea creuzetului.** După alegerea materialului refractar al creuzetului, se stabilesc dimensiunile d_2 (diametrul mediu) și h_2 (fig. 3.67) pe baza relațiilor

— volumul util

$$v = \frac{m}{\rho'} = \frac{\pi d_2^2}{4} h_2, \tag{3.165}$$

în care ρ' (în kg/m³) este densitatea metalului topit;

— coeficientul de zvelteţe

$$c = \frac{d_2}{h_2} = 0{,}5 \ldots 1, \tag{3.166}$$

impus de obținerea unui randament electric și termic cît mai mari; rezultă

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{4cm}{\pi\rho'}} \quad \text{și} \quad h_2 = \frac{d_2}{c} \text{ [m]}. \tag{3.167}$$

Grosimea peretelui creuzetului a_c se adoptă pe baza relației $a_c/d_2 = 0{,}1 \ldots 0{,}25$, iar grosimea izolației de azbest se ia $a_a = 3 \ldots 5$ mm.

b. **Alegerea frecvenței de lucru.** Aceasta se face ținînd cont de:

— randamentul electric al cuptorului, care are valori acceptabile pentru $d_2/\sqrt{2}\delta_2 \geqslant 7$ (rel. 3.153), adică (din rel. 3.87)

$$f \geqslant \frac{25 \cdot 10^6 \rho_2}{\mu_{r_2} \cdot d_2^2} \text{ [Hz]}, \tag{3.168}$$

în care ρ_2 este rezistivitatea (în Ωm), μ_{r_2} — permeabilitatea magnetică relativă a metalului în stare topită, d_2 — diametrul creuzetului (în m);

— mărimea bucăților solide de metal, avînd în vedere bucățile de grosime finită preiau puterea activă numai dacă au dimensiuni suficient de mari în raport cu frecvența cîmpului inductor (§ 3.3.1*c*) — figura 3.68.

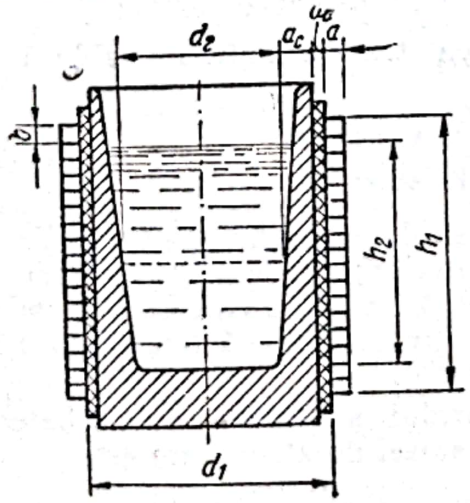


Fig. 3.67. Dimensiunile cuptorului de inducție cu creuzet.

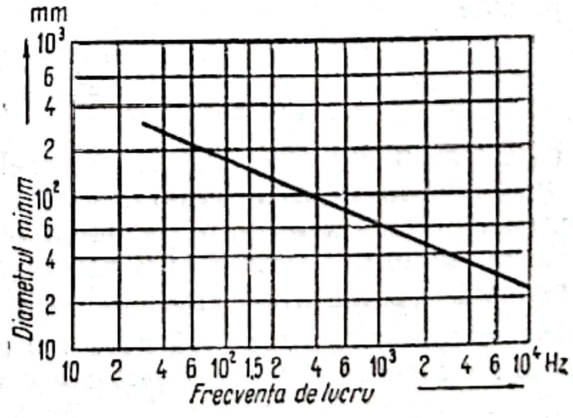


Fig. 3.68. Dimensiunile minime ale bucăților solide de metal în funcție de frecvența de lucru.

Tabela 3.17

Date tehnice orientative pentru topirea oţelului şi fontei în cuptoarele electrice de inducţie, cu creuzet [3]

Capacitatea kg	Frecvenţa curentului Hz	Puterea generatorului kW	Timpul de topire min	Consumul specific de energie electrică, kWh/t
10	300000...100000	30... 60	20... 15	1500...2000
50	70000... 10000	60... 100	40... 30	800...1000
250	3000... 2000	150... 250	70... 50	700 ...800
500	2000... 1000	250... 500	70... 50	600... 800
1000	1000... 500	500... 600	80... 60	600... 700
10000	500... 50	2500...3000	90...100	580... 620

Luînd în considerare şi factorii economici (investiţii, cheltuieli de exploatare), în tabela 3.17 se dau cîteva date orientative referitoare la topirea oţelului şi a fontei în cuptoarele cu creuzet, iar în tabela 3.18, cîteva date referitoare la topirea diferitelor metale la frecvenţă industrială.

Tabela 3.18

Caracteristici ale cuptoarelor cu creuzet, alimentate la frecvenţa industrială [50]

Metalul	Capacitatea, kg	Puterea, kW
Oţel	800... 8000	250...1800
Fier turnat	800...10000	150...2600
Aluminiu	300... 3000	100...1000
Magneziu	150... 1000	90... 300
Metale grele	500...30000	180...1000

c. **Alegerea sursei de alimentare.** Puterea transformată în căldură în şarjă este

$$P_2 = \frac{mi}{t_t \eta_t}, \tag{3.169}$$

în care timpul de topire t_t impus trebuie să depăşească valoarea indicată în figura 3.66 pentru frecvenţa aleasă anterior; randamentul termic al cuptoarelor cu creuzet are valoarea 80...95%, valoare care se determină pe baza calculului termic (§ 3.1.2) şi 3.1.3), ţinînd cont că temperatura în exteriorul creuzetului este de 150...200°C.

Deoarece puterea reactivă necesară cuptorului este furnizată de o baterie de condensatoare derivaţie, puterea cerută sursei de alimentare este

$$P_g \simeq P = \frac{P_2}{\eta_e} \tag{3.170}$$

Scanned with OKEN Scanner

în care randamentul electric al cuptorului $\eta_e = 60 \ldots 85\%$. Cu ajutorul lui P_g și frecvenței de lucru adoptate, din tabela 3.16 se alege sursa corespunzătoare.

d. **Dimensionarea inductorului.** Dimensiunile inductorului sînt

$$d_1 = d_2 + 2a_c + 2a_a, \qquad (3.171)$$
$$h_1 = (1{,}1 \ldots 1{,}3)h_2,$$

iar grosimea peretelui spirei (fig. 3.54) conform § 3.3.3. este

$$a \geqslant 1{,}57\,\delta_1. \qquad (3.172)$$

Parametrii inductorului se pot determina înlocuind cele N spire ale inductorului, deocamdată necunoscute, printr-o singură spiră, ca și cum spirele inductorului ar fi legate în paralel, în loc de serie.

Din relațiile (3.124) și (3.125) rezultă rezistența și reactanța interioară a inductorului cu o singură spiră

$$(R_1)_1 = (X_1)_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{h_1 \delta_1 g}, \qquad (3.173)$$

deoarece $K_{r_1} = K_{x_1} \simeq 1$; factorul de umplere $g = 0{,}6 \ldots 0{,}9$.

Reactanța aerului dintre inductor și șarjă — relațiile (3.137) și (3.138), este

$$(X_I)_1 - p^2 X_{II} = \omega\mu_0 \left(\frac{\pi d_1^2}{4h_1} \alpha_1 - \xi \frac{\pi d_2^2}{4h_2} \alpha_2 \right), \qquad (3.174)$$

în care raportul de transformare (rel. 3.143) este

$$p^2 = \xi \simeq \left(\frac{\alpha_M}{\alpha_2} \right)^2. \qquad (3.175)$$

Parametrii sistemului inductor — șarjă (rel. 3.148) sînt

$$(R)_1 = (R_1)_1 + \xi R_2 \qquad (3.176)$$
$$(X)_1 = (X_1)_1 + (X_I)_1 + \xi[X_2 - X_{II}], \qquad (3.177)$$

în care rezistența R_2 și reactanța X_2 a șarjei se calculează din relațiile (3.134) și (3.135).

Randamentul electric al cuptorului (rel. 3.151) este

$$\eta_e = \frac{\xi R_2}{(R)_1}, \qquad (3.178)$$

iar factorul de putere (rel. 3.155)

$$\cos \varphi \simeq \frac{(R)_1}{(X)_1}, \qquad (3.179)$$

având valori foarte scăzute, între 0,05 și 0,25.

Scanned with OKEN Scanner

Puterea absorbită de inductorul cuptorului

$$P = (NI_1)^2 \cdot (R)_1 = \frac{P_2}{\eta_e}, \tag{3.180}$$

în care P_2 este dat de relaţia (3.169), permite stabilirea solenaţiei necesare

$$(NI_1) = \sqrt{\frac{P_2}{(R)_1 \cdot \eta_e}}. \tag{3.181}$$

care, înlocuită în puterea aparentă a cuptorului

$$S = UI_1 = U\frac{(NI_1)}{N}, \tag{3.182}$$

ne dă numărul de spire al inductorului

$$N = \frac{(NI_1)U}{S} \tag{3.183}$$

U — fiind tensiunea de alimentare a cuptorului (aleasă sau impusă de sursa de alimentare), iar

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \tag{3.184}$$

se determină din relaţiile (3.179) şi (3.180).

Curentul absorbit de cuptor este

$$I_1 = \frac{(NI_1)}{N} \tag{3.185}$$

Dimensiunea axială b a spirei rezultă din relaţia (3.126), ca şi grosimea Δ a izolaţiei dintre spire (fig. 3.54).

Verificările care se impun se referă la:

— densitatea de curent

$$J_1 = \frac{I_1}{b\delta_1} \leqslant 70 \text{ A/mm}^2 \tag{3.186}$$

în cazul răcirii cu apă a inductorului;

— intensitatea cîmpului electric dintre spire

$$E = \frac{U}{N\Delta} \leqslant E_{adm}, \tag{3.187}$$

în care E_{adm} pentru aer este 10...40 V/mm, iar pentru izolaţie între spire — 100 V/mm.

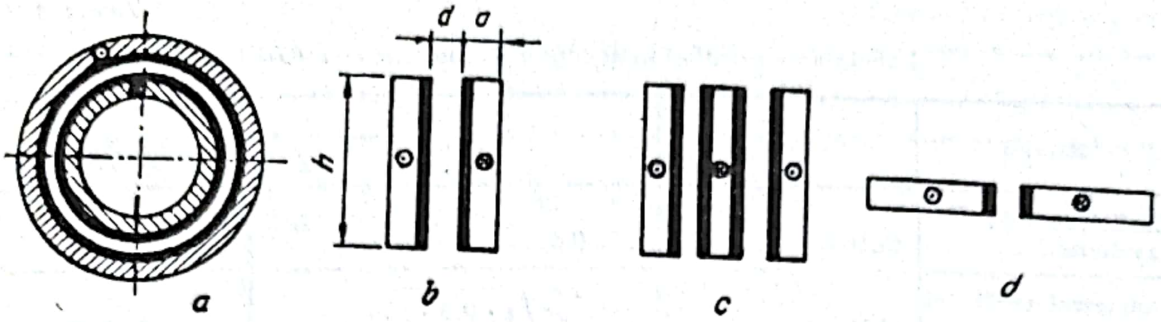


Fig. 3.69. Dispoziția barelor conductoare:
a — țevi concentrice; *b*, *c*, *d* — bare paralele.

Secțiunea necesară a tuturor coloanelor din tole care formează *ecranul feromagnetic* este

$$A_e = (0{,}7 \ldots 0{,}9)\frac{U}{4{,}44fBN}, \qquad (3.188)$$

B fiind inducția magnetică admisibilă a tolelor (0,6 ...0,9 T pentru 50 Hz și 0,05 ... 0,15 T pentru 2500 Hz).

Rețeaua electrică între sursa de alimentare și cuptor se construiește din țevi sau bare dreptunghiulare de cupru, aluminiu (fig. 3.69), cabluri de forță coaxiale sau fără manta exterioară; grosimea optimă a a barelor este determinată din condiția de rezistență electrică minimă ($a \geqslant 1{,}57\ \delta$) în curent alternativ de frecvență ridicată (§ 3.3.3*b*, și 3.3.3, *c*), iar secțiunea este impusă de condiția de a nu se depăși încălzirea în curent continuu

$$I \leqslant I_c\sqrt{\frac{A_a}{A}}, \qquad (3.189)$$

în care: I_c este valoarea admisibilă a curentului continuu;
A_a — secțiunea activă a barei;
A — secțiunea totală a barei.

f. În continuarea calculului se alege bateria de condensatoare derivație pentru compensarea factorului de putere al cuptorului la $\cos\varphi = 1$ (§ 1.6), se alege secțiunea goală a spirelor inductorului pe baza răcirii acestora cu apă și pompa care asigură debitul necesar de apă.

g. În final se stabilesc randamentul total al instalației (rel. 3.1) și consumul specific de energie electrică (rel. 3.8) mărimi care determină economicitatea instalației respective.

Exemplu. Să se calculeze un cuptor electric de inducție cu creuzet pentru topirea oțelului.

Datele de calcul sînt: capacitatea cuptorului $m = 500$ kg; densitatea oțelului $\rho' = 7200$ kg/m³; rezistivitatea oțelului lichid $\rho = 136{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ωm; temperatura de topire $\theta_t = 1\,520$ °C, de golire $\theta_g = 1\,650$ °C (tab. 3.13); timpul de topire $t_t = 1{,}1$ h; bucățile de metal destinat topirii au diametrul minim de 100 mm.

Calculele sînt cuprinse în tabela 3.19.

Tabela 3.19

Exemplu de calcul al unui cuptor de inducție cu creuzet

Mărimea	Formula		Calculul	Rezultatul
Coeficientul de zvelteţe	(3.166)		$c = 0{,}5 \ldots 1$	0,6
Diametrul mediu al creuzetului	(3.167)		$d_2 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0{,}6 \cdot 500}{\pi \cdot 7200}}$	0,38 m
Înălţimea creuzetului	(3.167)		$h_2 = \frac{0{,}38}{0{,}6}$	0,63 m
Grosimea peretelui creuzetului	$\frac{a_c}{d_2} = 0{,}1 \ldots 0{,}25$		$a_c = (0{,}1 \ldots 0{,}25) \cdot 0{,}38$	0,065 m
Grosimea izolaţiei de azbest	$a_a = 3 \ldots 5$ mm			5 mm
Frecvenţa de lucru	alegere-tab. 3.17		$f = 1000 \ldots 2000$	1000 Hz
	verificare	(3.168)	$f \geqslant \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 136{,}6 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0{,}38^2}$	$\geqslant$ 237 Hz
		fig. 3.66	$t_t = 1{,}1\ h$	$>$ 0,5 h
		fig. 3.68	$d_{min} = 100$ mm	$>$ 60 mm
Randamentul termic	§ 3.1.3		—	$\eta_t = 0{,}85$
Energia specifică	fig. 3.2			$i = 0{,}43$ kWh/kg
Puterea transformată în căldură în şarjă	(3.169)		$P_2 = \frac{500 \cdot 0{,}42}{1{,}1 \cdot 0{,}85}$	225 kW
Puterea generatorului	(3.170)		$P_g = \frac{225}{0{,}77}$	292 kW
Generatorul ales	Generator rotativ de medie frecvenţă $P_g = 300$ kW, $U_g = 2300$ V, $f_g = 1000$ Hz.			
Diametrul inductorului	(3.171)		$d_1 = 0{,}38 + 2 \cdot 0{,}065 + 2 \cdot 0{,}005$	0,52 m
Înălţimea inductorului	(3.171)		$h_1 = (1{,}1 \ldots 1{,}3) \cdot 0{,}63$	0,73 m

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.19 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Adîncimea de pătrundere	(3.87) sau fig. 3.48	$\delta_1 = 503\sqrt{\frac{1{,}9\cdot10^{-8}}{1\cdot1000}}$	$0{,}22\cdot10^{-2}$ m
		$\delta_2 = 503\sqrt{\frac{136{,}6\cdot10^{-8}}{1\cdot1000}}$	$1{,}86\cdot10^{-2}$ m
Grosimea peretelui spirei	(3.172)	$a \geqslant 1{,}57\cdot0{,}22\cdot10^{-2} = 0{,}345\cdot10^{-2}$ m	$0{,}35\cdot10^{-2}$ m
Rezistența și reactanța internă a inductorului ($N=1$)	(3.173) $g = 0{,}8$	$(R_1)_1 = (X_1)_1 = 1{,}9\cdot10^{-8}\cdot\frac{\pi\cdot0{,}52}{0{,}73\cdot0{,}22\cdot10^{-2}\cdot0{,}8}$	$2{,}41\cdot10^{-5}\ \Omega$
Rezistența și reactanța șarjei	(3.134) (3.135) $K_{r_2} = K_{x_2} = 1$; $N = 1$	$R_2 = X_2 = \frac{\pi\cdot0{,}38\cdot136{,}6\cdot10^{-8}}{0{,}63\cdot1{,}86\cdot10^{-2}}$	$13{,}4\cdot10^{-5}\ \Omega$
Factorii de corecție	tab. 3.14 tab. 3.15	$d_1/h_1 = 0{,}52/0{,}73 = 0{,}71$ $d_2/h_2 = 0{,}38/0{,}61 = 0{,}62$ $h_1/h_2 = 0{,}73/0{,}61 = 1{,}2$	$\alpha_1 = 0{,}76$ $\alpha_2 = 0{,}785$ $\alpha_M = 0{,}62$
Raportul de transformare	(3.175)	$p^2 = \xi \simeq \left(\frac{0{,}62}{0{,}785}\right)^2$	0,616
Reactanța aerului ($N = 1$)	(3.174)	$(X_I)_1 - p^2 X_{II} = 2\pi\cdot1.000\cdot\cdot4\pi\cdot10^{-7}\left(\frac{\pi\cdot0{,}52^2}{4\cdot0{,}73}\cdot0{,}76 - 0{,}616\frac{\pi\cdot0{,}38^2}{4\cdot0{,}63}\cdot0{,}785\right)$	$102{,}5\cdot10^{-5}\ \Omega$
Parametrii sistemului inductor ($N = 1$) — șarjă	(3.176) (3.177)	$(R)_1 = (2{,}41 + 0{,}616\cdot\cdot13{,}4)10^{-5}$ $(X)_1 = (2{,}41 + 0{,}616\cdot13{,}4 + + 102{,}5)\cdot10^{-5}$	$10{,}7\cdot10^{-5}\ \Omega$ $113{,}2\cdot10^{-5}\ \Omega$
Randamentul electric	(3.178)	$\eta_e = \frac{0{,}616\cdot13{,}4\cdot10^{-5}}{10{,}7\cdot10^{-5}}$	0,77
Factorul de putere	(3.179)	$\cos\varphi \simeq \frac{10{,}7\cdot10^{-5}}{113{,}2\cdot10^{-5}}$	0,094
Puterea activă absorbită de inductor	(3.180)	$P = \frac{225}{0{,}77}$	292 kW
Puterea aparentă a cuptorului	(3.184)	$S = \frac{292}{0{,}094}$	3095 kVA

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.19 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Solenaţia inductorului	(3.181)	$(NI_1) = \sqrt{\frac{292 \cdot 10^{+3}}{10{,}7 \cdot 10^{-5}}}$	50.900 Asp
Numărul de spire al inductorului	(3.183)	$N = \frac{50900 \cdot 2300}{3095 \cdot 10^3}$	38 sp.
Curentul absorbit	(3.185)	$I_1 = \frac{50900}{38}$	1340 A
Dimensiunea axială a spirei	(3.126)	$b = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}73}{38}$	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$ m
Grosimea izolaţiei dintre spire	(fig. 354) $\Delta = \frac{h_1}{N} - b$	$\Delta = \frac{0{,}73}{38} - 1{,}5 \cdot 10^{-2}$	$0{,}4 \cdot 10^{-2}$ m
Densitatea de curent	(3.186)	$J_1 = \frac{1340}{15 \cdot 2{,}2}$	37,2 A/mm²
Intensitatea cimpului electric	(3.187)	$E = \frac{2300}{38 \cdot 4}$	15,1 V/mm
Ecranul feromagnetic	(3.188) $B = 0{,}1$ T	$A_e = (0{,}7 \ldots 0{,}9) \cdot \frac{2300}{4{,}44 \cdot 1000 \cdot 0{,}1 \cdot 38}$	0,12 m²
Parametrii sistemului inductor ($N = 38$) — şarjă	$R = N^2(R)_1$ $X = N^2(X)_1$ $L = \frac{X}{\omega}$	$R = 38^2 \cdot 10{,}7 \cdot 10^{-5}$ $X = 38^2 \cdot 113{,}2 \cdot 10^{-5}$ $L = \frac{1{,}63}{2\pi \cdot 1000}$	0,15 Ω 1,63 Ω $0{,}26 \cdot 10^{-3}$H
Secţiunea barei reţelei de alimentare (2 bare pe fază)	§ 1.5.1 ; (3.172) $A_a = \delta_1 \cdot b'$ $A = a' \cdot b'$	$A_a = 2 \cdot (2{,}2 \cdot 80)$ $A = 2 \cdot (10 \cdot 80)$	$a' = 10$ mm $b' = 80$ mm $A_a = 352$ mm² $A = 1600$ mm²
Intensitatea admisibilă în c.c.	tab. 1.5	—	$I_c = 3305$ A
Verificare la încălzire	(3.189)	$I \leqslant 3305 \sqrt{\frac{352}{1600}}$	1340 < 1550 A
Parametrii bateriei de condensatoare	(3.157) (3.158)	$C = \frac{0{,}26 \cdot 10^{-3}}{0{,}15^2 + 1{,}63^2}$ $Q = 2\pi \cdot 1000 \cdot 10^{-4} \cdot 2300^2$	$1 \cdot 10^{-4}$ $3320 \cdot 10^3$VAr
Randamentul total	(3.1)	$\eta = 0{,}85 \cdot 0{,}77$	0,654
Consumul specific de energie electrică	(3.8)	$Q_s = \frac{0{,}43}{0{,}654} \cdot 10^3$	60 kWh/t

Scanned with OKEN Scanner

3.3.7. Echipamentul electric al cuptoarelor de inducţie cu creuzet

Echipamentul electric se compune din sursa de alimentare, aparatajul de comandă, protecţie, măsură şi bateria de condensatoare conectată la bornele cuptorului în scopul îmbunătăţirii factorului de putere.

Parametrii cuptorului se modifică în cursul procesului de topire, ceea ce determină variaţia curentului absorbit din reţea şi a factorului de putere. Regimul optim de funcţionare a cuptorului, adică regimul în care productivitatea este maximă iar consumul de energie este minim, se obţine prin menţinerea curentului şi a factorului de putere la valoarea optimă.

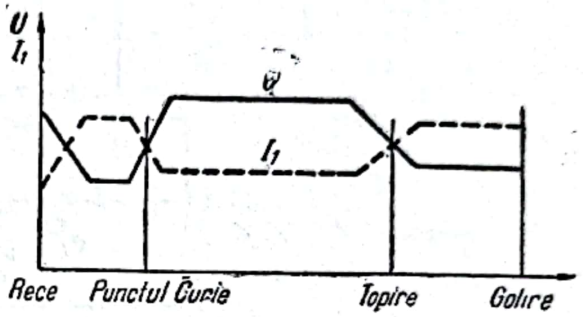


Fig. 3.70. Variaţia curentului şi a tensiunii în timpul topirii oţelului în cuptorul cu creuzet.

La începutul topirii curentul are o valoare ridicată (fig. 3.70), valoare ce poate fi redusă prin micşorarea tensiunii de alimentare, iar în jurul punctului Curie curentul scade ceea ce impune mărirea tensiunii. La cuptoarele de frecvenţă industrială se utilizează în acest scop un autotransformator sau transformator cu prize, iar la cuptoarele de frecvenţă mai ridicată, se reglează tensiunea sursei de alimentare sau se comută numărul de spire al inductorului [2]. Factorul de putere optim se obţine prin variaţia puterii bateriei de condensatoare (§ 1.6.2).

În figura 3.71 este dată schema de alimentare a unui cuptor cu creuzet de frecvenţă industrială. Pentru a transforma sarcina monofazată reprezentată de cuptor într-o sarcină trifazată simetrică se utilizează o instalaţie de simetrizare, compusă dintr-o bobină L_s şi un condensator C_s ambele reglabile (conexiunea Steinmetz).

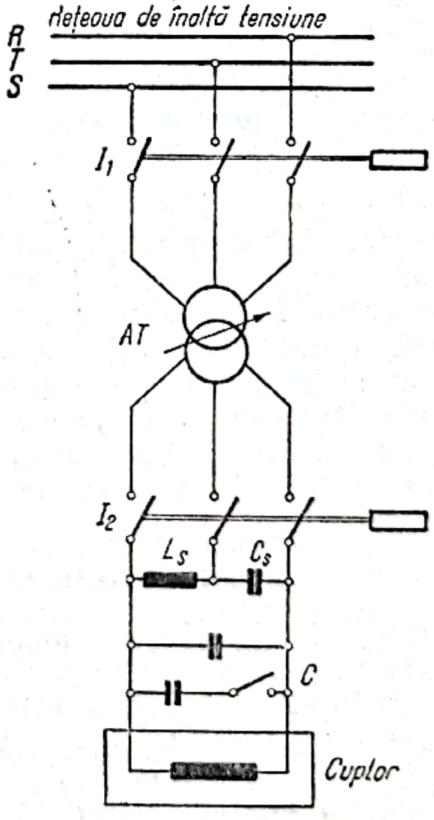


Fig. 3.71. Schema electrică de alimentare a unui cuptor de inducţie cu creuzet cu frecvenţă industrială.

La compensarea totală a cuptorului ($\cos \varphi = 1$) curenţii ceruţi din

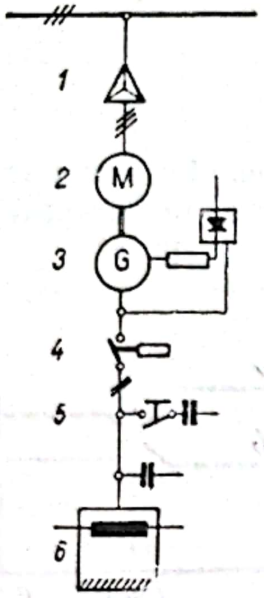


Fig. 3.72. Schema electrică monofilară a cuptorului cu creuzet alimentat de un generator rotativ de medie frecvenţă:
1 — comutator stea-triunghi; *2* — motor de antrenare; *3* — generator rotativ de medie frecvenţă excitat în curent continuu; *4* — contactor; *5* — baterie de condensatoare; *6* — cuptor.

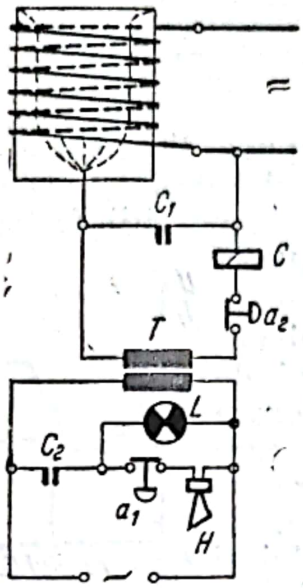


Fig. 3.73. Dispozitiv de semnalizare a fisurării creuzetului.

reţea sînt egali, în cazul în care

$$\omega L_s = \frac{1}{\omega C_s} = \sqrt{3}R, \quad (3.190)$$

R fiind rezistenţa cuptorului [50].

Schemele electrice de alimentare a cuptoarelor cu creuzet de la triplorul de frecvenţă cu miezuri feromagnetice sînt indicate în figura 3.59, de la convertorul de frecvenţă cu tiristoare — figura 3.62, iar de la generatorul rotativ de medie frecvenţă — figura 3.72.

Un deranjament cu consecinţe grave asupra instalaţiei îl constituie fisurarea creuzetului şi pătrunderea metalului topit la inductor, urmată de topirea acestuia însoţită de explozie la contactul cu apa de răcire. Prevenirea fisurării creuzetului este posibilă prin folosirea unui dispozitiv de semnalizare acustică şi optică (fig. 3.78), constînd din electrozi îngropaţi în vatră în contact permanent cu metalul topit, alimentaţi prin transformatorul de separaţie T. Curentul în secundarul transformatorului care are o valoare redusă în cazul creuzetului nefisurat, la apariţia unei fisuri, urmată de micşorarea rezistenţei electrice a materialului creuzetului, va determina închiderea contactelor C_1 şi C_2 ale contactorului C şi semnalizarea optică şi acustică a defecţiunii; butonul a_1 permite deconectarea hupei H, iar butonul a_2 readucerea schemei în starea iniţială.

3.3.8. Cuptoare electrice de inducţie cu canal

Cuptoarele electrice cu canal (cu miez feromagnetic) sînt folosite pentru elaborarea fontei, a metalelor şi aliajelor neferoase (aluminiu, cupru, zinc etc), iar în ultimul timp se utilizează tot mai mult la elaborarea oţelului.

Cuptorul cu canal reprezintă un transformator cu circuit feromagnetic *2* (fig. 3.74), avînd înfăşurarea primară (inductorul) *4*; metalul ce urmează a fi topit se află în canalul *1* (care formează înfăşurarea secundară în scurt-circuit a transformatorului), ce comunică cu rezervorul *3*.

Spirele inductorului au secţiunea dreptunghiulară în majoritatea cazuri-

Scanned with OKEN Scanner

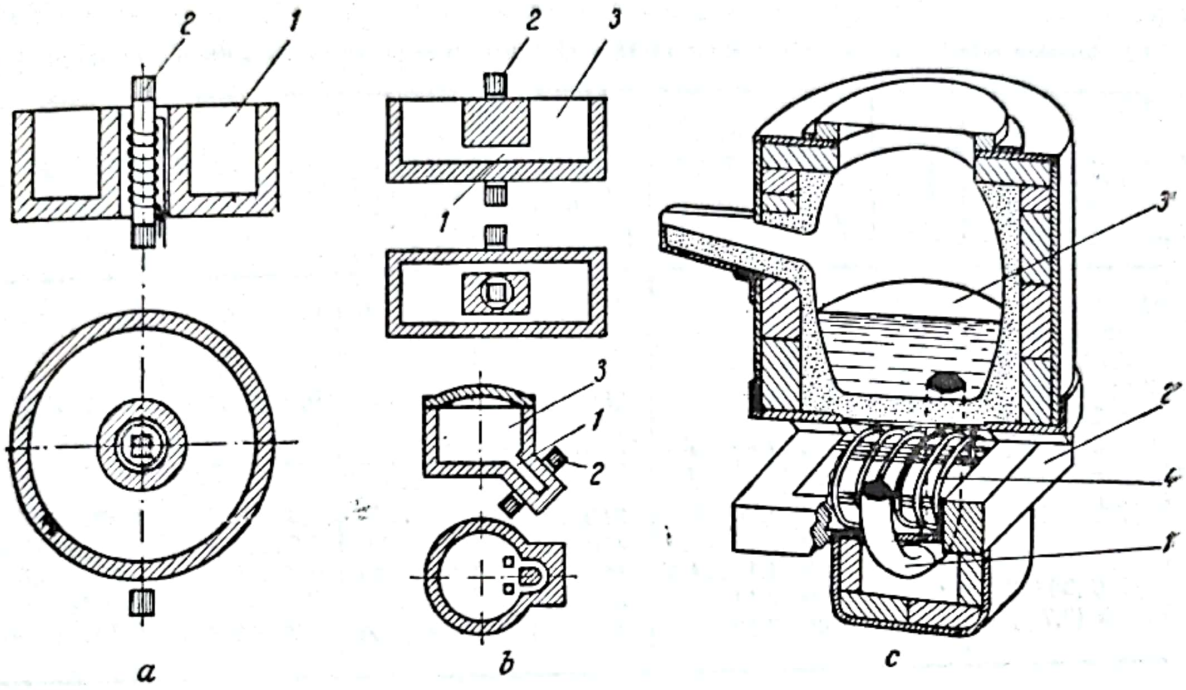


Fig. 3.74. Cuptor electric cu canal:
a — orizontal descoperit; *b* — orizontal acoperit; *c* — vertical; *d* — înclinat.

lor, fiind izolate cu materiale care rezistă la temperatura de 150...200°C și răcite în general cu aer cu circulație forțată; răcirea cu apă a spirelor se utilizează în cazul încălzirii metalelor peste 1 200°C.

Din punct de vedere constructiv aceste cuptoare sînt cu: canal orizontal acoperit (fig. 3.74, *a*) sau descoperit (fig. 3.74, *b*), canal vertical (fig. 3.74, *c*) sau înclinat (fig. 3.74, *d*). Variantele constructive diferă și prin numărul de canale dispuse pe aceeași coloană (fig. 3.77) sau pe coloane diferite ale unui transformator bi-sau trifazat (fig. 3.78).

Cuptorul este prevăzut cu un dispozitiv pentru basculare în vederea golirii.

Transformarea energiei electromagnetice în energie termică are loc în metalul din canal, uniformizarea temperaturilor în șarjă realizîndu-se pe baza agitației acesteia sub acțiunea forțelor electrodinamice.

Principalele avantaje pe care le prezintă cuptorul cu canal constau în simplitatea construcției, procentul mic de ardere a metalului, factorul de putere acceptabil și consumul specific de energie electrică mai redus decît la alte tipuri de cuptoare (tab. 3.20).

Dezavantajele cuptoarelor cu canal sînt:

— necesitatea menținerii unei părți din metal în canal după turnarea șarjei, metal care trebuie încălzit pînă la încărcarea următoare a cuptorului;

— dificultatea utilizării aceluiași cuptor pentru metale de diferite compoziții chimice;

Tabela 3.20

Date tehnice referitoare la topirea unor metale şi aliaje în cuptoarele de inducţie cu canal [2]

Denumirea metalului sau aliajului	Temperatura de topire °C	Temperatura de golire °C	Adîncimea de pătrundere la $f=50$ Hz cm	Consumul specific de energie electrică kWh/t	Puterea specifică pe unitatea de volum a canalului cuptorului P_c kW/dm³	Factorul de putere cos φ	Randamentul total al cuptorului η
Aluminiu	658	700	3,5	450...520	3... 6	0,4...0,6	0,60...0,75
Bronz fosforos (93,1% Cu; 3% Zn; 4%Sn)	1060	1225	4,5	300...330	20...25	0,6...0,8	0,65...0,75
Alamă (6,75% Cu, 32,5% Zn)	920	1140	4,3...4,5	200...250	26...32	0,6...0,8	0,75...0,85
Magneziu	661	700	—	—	—	—	—
Cupru	1083	1200	3,26	310...340	50...60	0,4...0,5	0,60...0,65
Nichel	1452	1600	—	470...500	50...80	0,7...0,8	0,65...0,70
Zinc	420	500	4,1...4,3	120...130	30...50	0,7...0,75	0,77...0,80
Oţel (0,35%C)	1510	1650	7,11	450...650	—	—	0,72
Fontă (3,7% C)	1200	1500	7,12	450...470	50...80	0,7...0,8	0,70...0,80

— necesitatea utilizării materialelor refractare de calitate superioară pentru confecţionarea canalului.

Faţă de cuptorul cu creuzet de frecvenţă industrială, cuptorul cu canal are un randament total şi un factor de putere mai ridicat şi dă posibilitatea topirii şi turnării concomitente a şarjei.

Efecte electrodinamice în canalul cuptorului. Interacţiunea curenţilor din metalul conţinut în canal cu cîmpurile magnetice intense create de curentul din inductor, determină apariţia unor forţe electrodinamice orientate de la suprafaţa interioară (dinspre inductor) spre cea exterioară a canalului, forţe care agită metalul din canal.

Presiunea electrodinamică maximă p apare pe suprafaţa exterioară a canalului şi are valoarea [50]

$$p_e = \frac{I_2^2}{2b_2^2}\mu_2, \qquad (3.191)$$

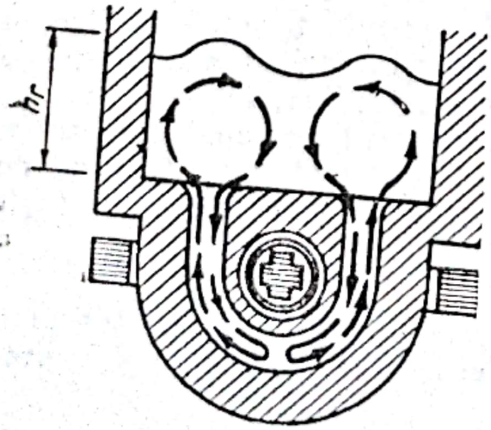


Fig. 3.75. Agitaţia electrodinamică a metalului în cuptorul cu canal.

b_2 fiind dimensiunea canalului paralelă cu axul inductorului (fig. 3.77); pe suprafaţa interioară a canalului presiunea fiind minimă, metalul din canal se va deplasa ca în figura 3.75. La agitaţia metalului contribuie şi efectul termic de convecţie, deoarece temperatura metalului din rezervor este mai scăzută decît cea a metalului din canal.

Scanned with OKEN Scanner

Presiunea electrodinamică este echilibrată de presiunea hidrostatică a metalului din rezervor și presiunea atmosferică p_{at}:

$$p_e = \gamma h_r + p_{at}, \tag{3.192}$$

în care γ este greutatea specifică a metalului topit și h_r — înălțimea metalului din rezervor.

Din relațiile (3.191) și (3.192) rezultă valoarea curentului I_2 admisibil

$$I_2 \leqslant b_2 \sqrt{\frac{2}{\mu_2}(\gamma h_r + p_{at})}, \tag{3.193}$$

pentru ca presiunea electrodinamică să nu depășească presiunea hidrostatică a metalului; în cazul neîndeplinirii acestei condiții, vîna de metal se poate întrerupe periclitînd funcționarea inductorului (cazul transformatorului de curent funcționînd în gol) și a cuptorului, metalul fiind aruncat din rezervor.

Întreruperea vînei de metal apare și datorită evaporării metalului în cazul unei supraîncălziri locale.

Datorită acestor considerente, puterea p_r (în kW/dm³) pe unitatea de volum a canalului este limitată la valorile indicate în tabela 3.20.

La topirea oțelului puterea pe canal a putut fi mărită de la 150 kW la 500 kW prin realizarea unei secțiunii variabile a canalului (fig. 3.76), ceea ce a contribuit la utilizarea pe scară tot mai largă a cuptoarelor cu canal în acest scop.

Puterea indusă în șarjă. În figura 3.77 este reprezentat un cuptor cu două canale verticale de secțiune dreptunghiulară, alimentat printr-un transformator monofazat cu coloane.

Canalul se compune din porțiunile:

— *A*, concentrică cu inductorul reprezentînd un cilindru gol excitat în interior (§ 3.3.2, *d*);

— *B*, verticală reprezentînd un conductor plan de grosime finită (§ 3.3.1b);

— *C*, o parte din rezervor reprezentînd un conductor plan de grosime practic infinită (§ 3.3.1, *a*).

Puterea aparentă transmisă porțiunii *A* a canalului de către cîmpul magnetic $\overline{H}_0$ este dată de vectorul lui Poynting (rel. 3.119) înmulțit cu suprafața,

$$\underline{S}_A = H_0^2 k_2 \rho_2 (K_{rA} + \mathrm{j}\, K_{xA}) \pi d_2 \frac{\beta}{360} h_2, \tag{3.194}$$

în care β reprezintă unghiul la centru al porțiunii circulare a canalului (în fig. 3.77, $\beta = 180°$); în cazul a n canale dispuse pe aceeași coloană, legea circuitului magnetic dă

$$nI_2 = H_0 n b_2 = H_0 h_2, \tag{3.195}$$

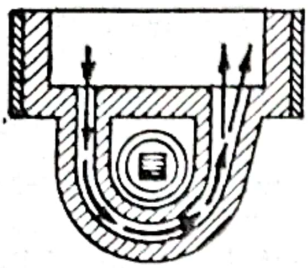


Fig. 3.76. Agitația metalului în cuptorul cu canal cu secțiune variabilă.

în care I_2 este curentul printr-un canal, iar h_2 — înălțimea totală a canalelor. Înlocuind în relația (3.194), cîmpul H_0 din relația (3.195), se obține

$$\underline{S}_A = (nI_2)^2 k_2 \rho_2 \frac{\pi d_2 \beta}{h_2 360} (K_{rA} + jK_{xA}). \qquad (3.196).$$

Puterea aparentă transmisă celor două porțiuni identice B (rel. 3.91) este

$$\underline{S}_B = H_0^2 k_2 \rho_2 (K_{rB} + jK_{xB}) \cdot 2 l_B h_2 ;$$

înlocuind pe H_0 din relația (3.195) se obține

$$\underline{S}_B = (nI_2)^2 k_2 \rho_2 \frac{2 l_B}{h_2} (K_{rB} + jK_{xB}). \qquad (3.198)$$

Pentru porțiunea C, puterea aparentă este dată de relația (3.81)

$$\underline{S}_C = H_0^2 k_2 \rho_2 (1 + j) l_C h_C, \qquad (3.199)$$

în care l_C și h_C sînt dimensiunile în plan ale rezervorului.

Cîmpul magnetic fiind

$$H_0 = \frac{nI_2}{h_C} \qquad (3.200)$$

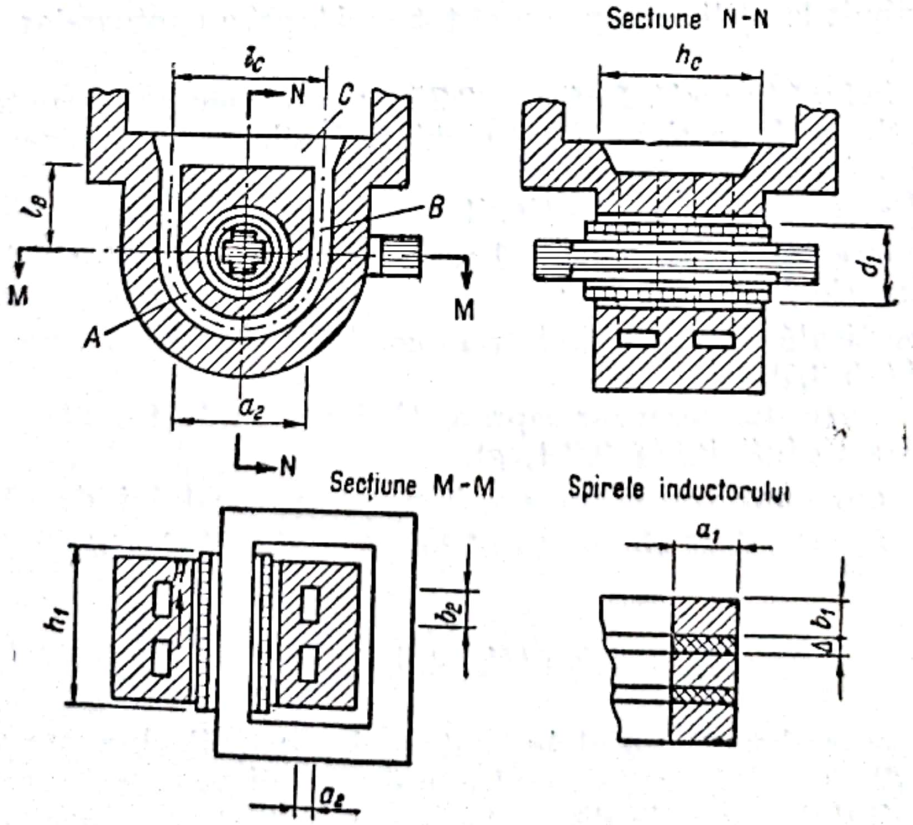


Fig. 3.77. Cuptor cu două canale verticale pe aceeași coloană a circuitului feromagnetic.

rezultă

$$\underline{S}_C = (nI_2)^2 k_2 \rho_2 \frac{l_C}{h_C}(1 + j). \tag{3.201}$$

Partea reală a puterii totale introduse în șarjă

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C,$$

reprezintă puterea activă

$$P_2 = (NI_1)^2 k_2 \rho_2 \left(\frac{\pi d_2 \beta}{h_2 \cdot 360} K_{rA} + \frac{2l_B}{h_2} K_{rB} + \frac{l_C}{h_C} \right), \tag{3.202}$$

iar partea imaginară — puterea reactivă

$$Q_2 = (NI_1)^2 k_2 \rho_2 \left(\frac{\pi d_2 \beta}{h_2 \cdot 360} K_{xA} + \frac{2l_B}{h_2} K_{xB} + \frac{l_C}{h_C} \right), \tag{3.203}$$

în care s-a înlocuit

$$nI_2 = NI_1, \tag{3.204}$$

conform teoriei transformatoarelor.

3.3.9. Calculul cuptoarelor electrice de inducție cu canal

La calculul cuptoarelor electrice cu canal se precizează caracteristicile metalului ce urmează a fi topit (tab. 3.20), capacitatea m (în kg) a cuptorului, regimul tehnologic necesar (temperatura de topire θ_t, de golire θ_g și timpul de topire t_t), tensiunea U de frecvență industrială a rețelei electrice de alimentare.

În continuare se vor indica principalele etape de calcul a cuptorului cu canal vertical din figura 3.77, celelalte tipuri calculîndu-se în același mod.

a. **Dimensionarea canalului.** Puterea dezvoltată într-unul din cele n canale (dispuse pe aceeași coloană) ale cuptorului este

$$P_c = \frac{P_2}{n} \tag{3.205}$$

în care puterea P_2 transformată în căldură în șarjă este dată de relația (3.169), randamentul termic η_t fiind într-o primă aproximație de 75...90%.

Volumul canalului este

$$v_c = \frac{P_c}{p_c}, \tag{3.206}$$

p_c fiind puterea pe unitatea de volum a canalului (tab. 3.20).

Secțiunea canalului poate fi circulară sau dreptunghiulară (aceasta din urmă fiind mai ușor de construit), avînd dimensiunile

$$a_2 \leqslant 0{,}75 \quad \delta_2, \tag{3.207}$$

Scanned with OKEN Scanner

pentru a se obține valori ridicate ale puterii active dezvoltate în canal, randamentului electric și factorului de putere (§ 3.3.3);

$$b_2 = (3\ldots5)a_2, \tag{3.208}$$

pentru a se evita posibilitatea de înfundare a canalului.

După alegerea materialului refractar (grosime 5...10 cm) care formează canalul, material care trebuie să aibă proprietăți refractare deosebite datorită faptului că gradientul de temperatură poate atinge 200°C/cm, se determină lungimea canalului,

$$l_{can} = \frac{v_c}{a_2 b_2}. \tag{3.209}$$

b. **Secțiunea coloanei circuitului feromagnetic.** Se schițează conturul canalului, rezultînd dimensiunile d_2, l_A, l_B și l_C, se plasează izolația termică de azbest a inductorului, rezultînd diametrul exterior d_1 al inductorului.

Grosimea a_1 a spirei inductorului, conform § 3.3.3. este

$$a_1 \geqslant 1{,}57\ \delta_1. \tag{3.210}$$

Se obține suprafața circulară în care se poate înscrie secțiunea miezului feromagnetic, dată de relația

$$S_{Fe} \geqslant \frac{U_S}{4{,}44fB}, \tag{3.211}$$

în care U_S reprezintă tensiunea pe spiră, $f = 50$ Hz, iar B — inducția magnetică admisibilă depinzînd de calitatea tolelor utilizate și de răcirea cu aer a miezului [58]; dacă secțiunea de fier calculată depășește suprafața disponibilă, se va mări lungimea canalului.

c. **Dimensionarea inductorului.** Relația (3.202) permite stabilirea solenației necesare

$$(NI_1) = \sqrt{\frac{P_2}{\frac{1}{\delta_2}\rho_2\left(\frac{\pi d_2 \beta}{h_2 \cdot 360} K_{r_A} + \frac{2l_B}{h_2} K_{r_B} + \frac{l_C}{h_C}\right)}}, \tag{3.212}$$

dimensiunile h_C, l_C ale rezervorului luîndu-se din schița cuptorului; înălțimea h_r a rezervorului rezultă din relațiile (3.193) și (3.204).

Puterea activă a cuptorului (neglijînd pierderile în circuitul feromagnetic) este

$$P_0 = P_1 + P_2, \tag{3.213}$$

puterea reactivă

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_a, \tag{3.214}$$

și puterea aparentă

$$S = \sqrt{P_0^2 + Q^2}; \tag{3.215}$$

Scanned with OKEN Scanner

în aceste relații P_1 este puterea activă pierdută în inductor (rel. 3.150)

$$P_1 = (NI_1)^2 \frac{\rho_1 \pi d_1}{\delta_1 h_1 g_1} K_{r_1}, \tag{3.216}$$

în care: $g_1 = 0{,}6 \ldots 0{,}9$ este factorul de umplere al inductorului;
$h_1 = \frac{h_2}{g_2} = \frac{nb_2}{g_2}$ — înălțimea inductorului ($g_2 = 0{,}2 \ldots 0{,}6$);
P_2 — puterea activă dezvoltată în canale (rel. 3.202);
Q_1 — puterea reactivă pierdută în inductor

$$Q_1 = P_1 \frac{K_{x_1}}{K_{r_1}}; \tag{3.217}$$

Q_2 — puterea reactivă a canalelor (rel. 3.203);
Q_a — puterea reactivă dezvoltată în spațiul de aer dintre inductor și canal (rel. 3.136)

$$Q_a = X'_a \cdot I_1^2 = \frac{\omega \mu_0}{h_1} A_a (NI_1)^2, \tag{3.218}$$

în care A_a reprezintă suprafața dintre inductor și canal.
Numărul de spire al inductorului este

$$N = \frac{(NI_1)}{I_1}, \tag{3.219}$$

în care curentul absorbit de cuptor

$$I_1 = \frac{S}{U}. \tag{3.220}$$

Dimensiunile spirelor sînt:
— secțiunea

$$s = \frac{I_1}{J_1}, \tag{3.221}$$

J_1 fiind densitatea admisibilă, a curentului în inductor (1,4 ... 1,8 A/mm² pentru circulație naturală a aerului, 2,5 ... 4 A/mm² pentru răcire forțată cu aer și $\leqslant 70$ A/mm² pentru răcire cu apă);
— dimensiunea axială a spirei

$$b_1 = \frac{s}{a_1}; \tag{3.222}$$

— grosimea izolației dintre spire

$$\Delta = \frac{b_1}{g_1} - b_1. \tag{3.223}$$

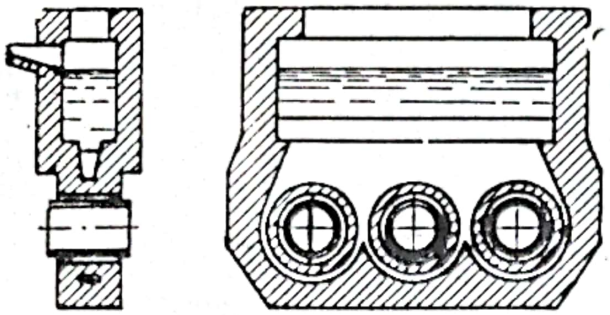


Fig. 3.78. Cuptor electric trifazat, cu trei canale.

d. **Dimensionarea circuitului feromagnetic al cuptorului.** Se verifică inducția în miezul feromagnetic

$$B = \frac{U}{4{,}44 f S_{Fe} N}, \qquad (3.224)$$

care nu trebuie să depășească valorile limită admisibile și pe baza schiței cuptorului se determină dimensiunile circuitului feromagnetic și pierderile în fier P_{Fe}.

e. **Mărimile principale ale cuptorului.** Puterea aparentă a cuptorului

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \qquad (3.225)$$

în care $P = m(P_1 + P_2 + P_{Fe})$ (3.226)

și $Q = m(Q_1 + Q_2 + Q_a)$, (3.227)

m fiind numărul canalelor dispuse pe coloane diferite ale cuptorului (fig. 3.78).

Randamentul electric

$$\eta_e = \frac{P_2}{P}, \qquad (3.228)$$

iar factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \qquad (3.229)$$

În continuarea calculului se alege bateria de condensatoare derivație pentru compensarea factorului de putere (§ 1.6.2) și ventilatorul pentru asigurarea debitului de aer necesar răcirii inductorului și miezului feromagnetic.

În final se stabilesc randamentul total al instalației (rel. 3.1) și consumul specific de energie electrică (rel. 3.8).

Exemplu. Să se calculeze un cuptor de inducție cu canal vertical ($n = 2$) pentru topirea cuprului (fig. 3.77).

Datele de calcul sînt : capacitatea cuptorului $m = 1\,000$ kg ; temperatura de topire $\theta_t = 1\,083°$ C, de golire $\theta_g = 1\,200$ °C, densitatea la temperatura de topire $\rho' = 8{,}3$ kg/dm³ (tab. 3.13) ; timpul de topire $t_t = 1$h, tensiunea de alimentare $U = 380$ V.

Rezultatele calculului sînt indicate în tabela 3.21.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.21

Exemplu de calcul al unui cuptor de inducție cu canal

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Energia specifică	fig. 3.2		$i=0{,}22$ kWh/kg
Puterea dezvoltată în șarjă	(3.169) $\eta_t = 0{,}76$	$P_2 = \dfrac{1000 \cdot 0{,}22}{1 \cdot 0{,}76}$	290 kW
Puterea dezvoltată într-un canal	(3.205)	$P_c = \dfrac{290}{2}$	145 kW
Puterea specifică	tab. 3.20		$p_c=50$ kW/dm³
Volumul canalului	(3.206)	$V_c = \dfrac{145}{50} \cdot 10^{-3}$	$2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m³
Adîncimea de pătrundere	(3.87)	$\delta_1 = 503 \sqrt{\dfrac{1{,}9 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 50}}$	$0{,}95 \cdot 10^{-2}$ m
	tab. 3.20		$\delta_2=3{,}26 \cdot 10^{-2}$m
Dimensiunile canalului	(3.207) (3.208) (3.209)	$a_2 \leqslant 0{,}75 \cdot 3{,}26 \cdot 10^{-2} = 2{,}44 \cdot 10^{-2}$ $b_2 = (3\ldots5)\ 2{,}2 \cdot 10^{-2}$ $l_{can} = \dfrac{2{,}9 \cdot 10^{-3}}{2{,}2 \cdot 11 \cdot 10^{-4}}$	$2{,}2 \cdot 10^{-2}$ m $11 \cdot 10^{-2}$ m 1,2 m
Dimensiuni rezultate din schițarea cuptorului	$l_A = \dfrac{\pi(d_2 + a_2)\beta}{360}$ $l_C = d_2 + a_2$ $l_{can} = l_A + 2l_B$	$l_A = \dfrac{\pi(0{,}44 + 0{,}022) \cdot 180}{360}$ $l_C = 0{,}44 + 0{,}022$ $l_{can} = 0{,}724 + 2 \cdot 0{,}238$	$d_2 = 0{,}44$ m $l_A = 0{,}724$ m $l_B = 0{,}238$ m $l_C = 0{,}462$ m $l_{can} = 1{,}2$ m $d_1 = 0{,}21$ m $A_a = 0{,}0826$ m²
Grosimea spirei inductorului	(3.210)	$a_1 \geqslant 1{,}57 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$ m = 20 mm
Secțiunea miezului magnetic	(3.211) $U_s = 8{,}4$ V/sp $B = 1{,}2$ T	$s_{Fe} \geqslant \dfrac{8{,}4}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 1{,}2}$	0,0315 m²
Înălțimea totală a canalelor	(3.195)	$h_2 = 2 \cdot 11 \cdot 10^{-2}$	0,22 m
Înălțimea inductorului	$h_1 = \dfrac{h_2}{g_2}$; $g_2 = 0{,}5$	$h_1 = \dfrac{0{,}22}{0{,}5}$	0,44 m

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.21 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Volumul rezervorului	$V_{rez} = V_m - 2V_c$	$V_{rez} = \left(\frac{1000}{8,3} - 2 \cdot 2,9\right)10^{-3}$	0,114 m³
Dimensiunile rezervorului	h_C — adoptată l_C — determinată anterior $h_{rez} = \frac{V_{rez}}{l_C \cdot h_C}$	$h_{rez} = \frac{0,114}{0,462 \cdot 0,4}$	0,4 m 0,462 m 0,6 m
Factorii de rezistenţă şi reactanţă ai canalului	fig. 3.49, *b*	$\varepsilon_A = \varepsilon_B = 0,675$	$K_{rA} = K_{rB} = 1,3$ $K_{xA} = K_{xB} = 0,5$
Amperspirele inductorului	(3.212)	$(NI_1) = \sqrt{\frac{290 \cdot}{\frac{1}{3,26 \cdot 10^{-2}} \cdot 21 \cdot 10^{-8} \cdot} \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{\pi 0,44 \cdot 180}{0,22 \cdot 360} 1,3 + \frac{2 \cdot 0,238}{0,22} 1,3 + \frac{0,462}{0,4}\right)}$	73500 Asp
Greutatea specifică a metalului	$\gamma = \rho' g$; $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$	$\gamma = 8,3 \cdot 10^3 \cdot 9,81$	$8,14 \cdot 10^4 N/m^3$
Verificarea înălţimii metalului din rezervor	(3.193) (3.204) 1 at $\simeq 10^5$ N/m²	$h_r \geq \frac{1}{8,14 \cdot 10^4}\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{73500^2}{0,11^2} - 10^5\right)$	0,45 m
Factorii de rezistenţă şi reactanţă ai inductorului	fig. 3.49, *b*	$\varepsilon_1 = 2,09$	$K_{r_1} = 0,96$ $K_{x_1} = 1$
Puterea activă pierdută în inductor	(3.216) $g_1 = 0,8$	$P_1 = 73500^2 \frac{1,9 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,21}{0,95 \cdot 10^{-2} \cdot 0,44 \cdot 0,8}$	$20 \cdot 10^3$W
Puterea reactivă pierdută în inductor	(3.217)	$Q_1 = 20 \frac{1}{0,96}$	$21 \cdot 10^3$VAr

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.21 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Puterea reactivă a aerului dintre inductor și canal	(3.218)	$Q_a = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{0{,}44} \cdot 0{,}0826 \cdot 73500^2$	$400 \cdot 10^3$ VAr
Puterea reactivă a a canalelor	(3.203)	$Q_2 = 73500^2 \cdot \frac{1}{3{,}26 \cdot 10^{-2}} \cdot 21 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0{,}44 \cdot 180}{0{,}22 \cdot 360} \cdot 0{,}5 + \frac{2 \cdot 0{,}238}{0{,}22} \cdot 0{,}5 + \frac{0{,}462}{0{,}4}\right)$	$143 \cdot 10^3$ VAr
Puterea activă a cuptorului	(3.213)	$P_0 = 20 + 290$	310 kW
Puterea reactivă a cuptorului	(3.214)	$Q = 21 + 143 + 400$	564 kVAr
Puterea aparentă a cuptorului	(3.215)	$S = \sqrt{310^2 + 564^2}$	644 kVA
Curentul absorbit de cuptor	(3.220)	$I_1 = \frac{644 \cdot 10^3}{380}$	1700 A
Numărul de spire al inductorului	(3.219)	$N = \frac{73500}{1700}$	45 sp
Secțiunea spirei	(3.221) $J = 3{,}9$ A/mm²	$s = \frac{1700}{3{,}9}$	440 mm²
Dimensiunea axială a spirei	(3.222)	$b_1 = \frac{440}{20}$	22 mm = $= 2{,}2 \cdot 10^{-2}$ m
Grosimea izolației dintre spire	(3.223)	$\Delta = \frac{22}{0{,}8} - 22$	5,5 mm
Inducția în miezul feromagnetic	(3.224)	$B = \frac{380}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}0315 \cdot 45}$	1,2 T
Pierderile în fier	[58]	calculate pe baza dimensiunilor circuitului magnetic	$P_{Fe} = 2$ kW
Puterea activă, reactivă și aparentă a cuptorului	(3.226) m = 1 (3.225)	$P = 310 + 2$ $S = \sqrt{312^2 + 564^2}$	312 kW 645 kVA
Randamentul electric	(3.228)	$\eta_e = \frac{290}{312}$	0,93

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.21 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Factorul de putere	(3.229)	$\cos \varphi = \frac{312}{645}$	0,48
Randamentul total	(3.1)	$\eta = 0{,}76 \cdot 0{,}93$	0,707
Consumul specific de energie electrică	(3.8)	$Q_s = \frac{0{,}22}{0{,}707} \cdot 10^3$	310 kWh/t

3.3.10. Echipamentul electric al cuptoarelor de inducţie cu canal

Alimentarea cuptoarelor cu canal se realizează de la reţeaua industrială de joasă sau înaltă tensiune cu frecvenţa de 50 Hz, prin intermediul unui transformator sau autotransformator AT (fig. 3.79), prevăzut cu prize de tensiune, ceea ce dă posibilitatea modificării tensiunii de alimentare ţinînd

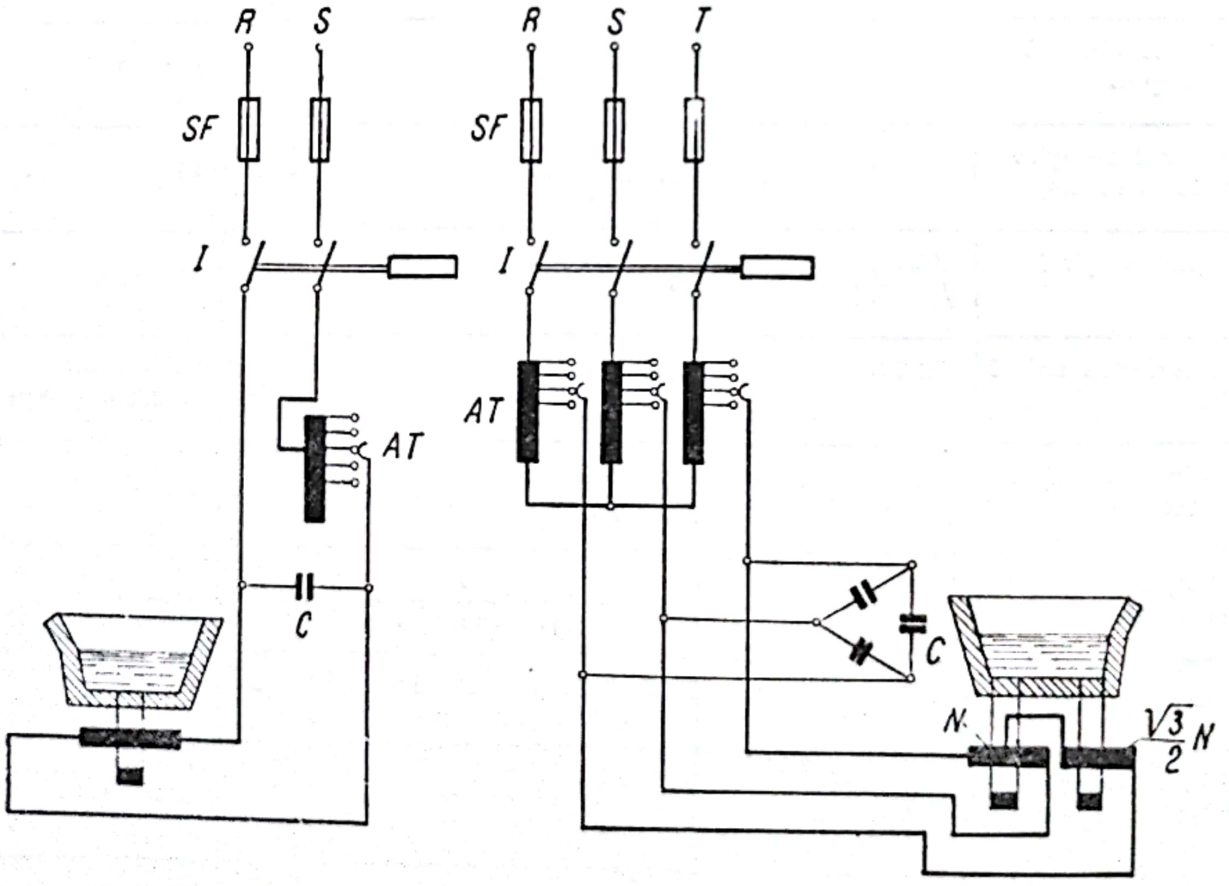


Fig. 3.79. Schema electrică de alimentare a cuptorului de inducţie cu canal:
a — inductor monofazat; *b* — inductor bifazat în montaj Scott.

Scanned with OKEN Scanner

cont de regimul de funcţionare al cuptorului: sarcina variază de la o valoare redusă între două şarje la o valoare mărită în timpul topirii.

Pentru îmbunătăţirea lui cos φ se utilizează o baterie de condensatoare derivaţie C, avînd puterea constantă, deoarece factorul de putere al cuptorului nu variază în timpul funcţionării cuptorului. Sisteme de reglare automată nu sînt necesare.

Cuptoarele de mică putere (fig. 3.79, *a*) au inductorul monofazat, pe cînd la cele de puteri medii sau mari, inductorul se realizează bifazat sau trifazat. Pentru simetrizarea sarcinii, inductoarele bifazate sînt conectate după schema Scott (fig. 3.79, *b*), N şi $\sqrt{3}/2\ N$ fiind numărul de spire al fiecărui inductor.

3.3.11. Încălzirea în volum a metalelor

Încălzirea în volum (profunzime) a semifabricatelor din oţel, cupru, aluminiu etc., ce urmează a fi prelucrate la cald (forjare, matriţare, îndoire, lipire) s-a dezvoltat datorită avantajelor pe care acest procedeu le are faţă de încălzirea indirectă cu rezistoare sau flacără:

— crusta de oxid formată la suprafaţă are o grosime foarte redusă, ceea ce micşorează pierderile de metal şi măreşte durata de utilizare a matriţelor:

— uniformitatea temperaturii în toată masa;

— temperatura se poate regla simplu şi precis;

— suprafaţa ocupată de instalaţia de încălzire este mai redusă.

Încălzirea semifabricatelor se produce pe baza inducţiei electromagnetice, un rol important avîndu-l transmiterea căldurii prin conducţie. Puterea indusă creşte cu mărirea frecvenţei, în timp ce adîncimea de pătrundere scade. Pe această bază instalaţiile de încălzire în volum pot fi alimentate la frecvenţa de 50 ... 150 Hz, sau la frecvenţa medie de 500...10 000 Hz, in-

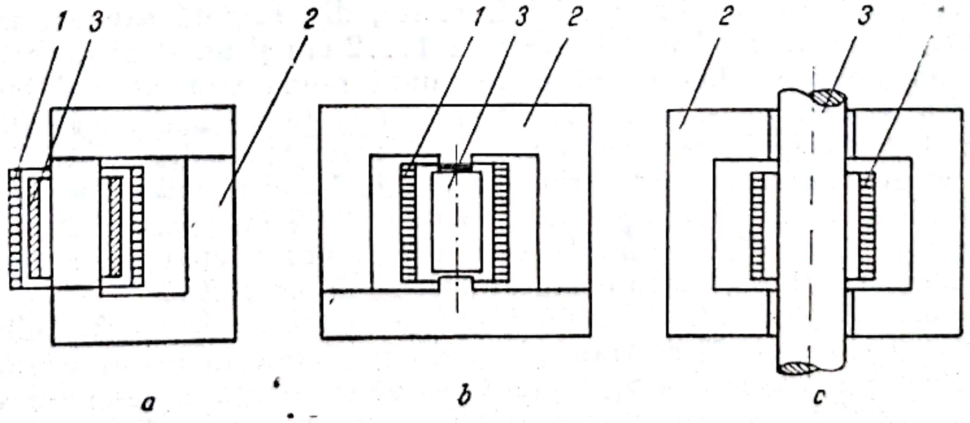


Fig. 3.80. Inductoare pentru încălzirea în volum la frecvenţă industrială:
a — semifabricate goale în interior; *b* — semifabricate scurte; *c* — semifabricate lungi. *1* — inductor; *2* — circuit feromagnetic; *3* — semifabricat.

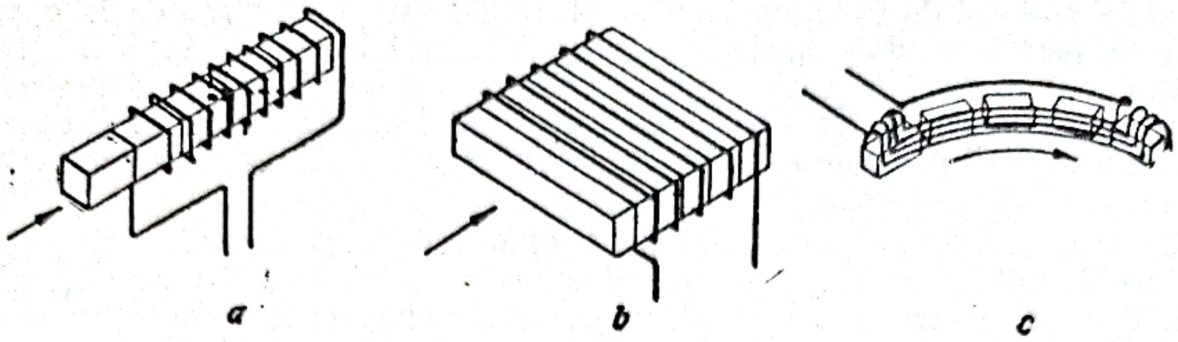
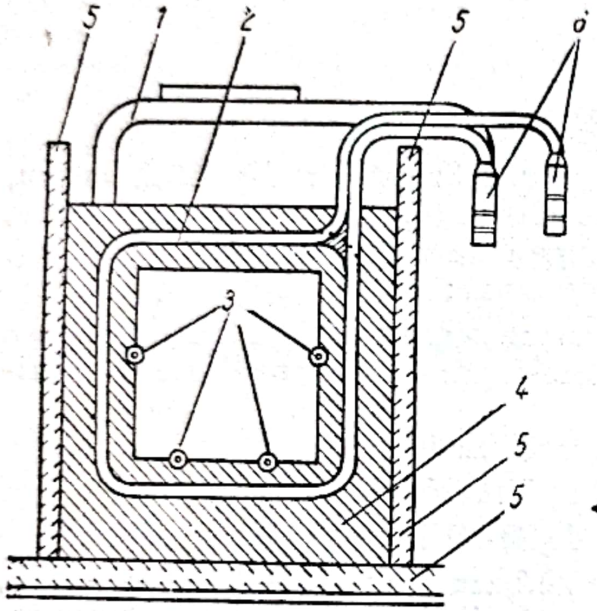


Fig. 3.81. Inductoare pentru încălzirea în volum la frecvenţă medie:
a — cu deplasare longitudinală a semifabricatelor; *b* — cu deplasare transversală a semifabricatelor; *c* — tip tunel.



← Fig. 3.82. Inductor pentru încălzirea în volum (secţiune transversală):
1 — racord electric; *2* — inductorul răcit cu apă; *3* — ghidaje; *4* — izolaţie termică; *5* — plăci de azbociment; *6* — racorduri pentru alimentarea cu apă.

ductoarele avînd forme diferite depinzînd de formele, dimensiunile pieselor şi de modul de deplasare al acestora (fig. 3.80 şi 3.81).

Inductorul (fig. 3.82) se execută în general sub formă solenoidală, din ţevi de cupru răcite cu apă, izolate între ele cu bandă de sticlă. Pentru izolaţia termică se folosesc cărămizi mici fasonate, din şamotă sau alt material refractar, avînd în mod uzual grosimea 1...2 cm şi un strat de azbest de 1...2 mm grosime. Pentru obţinerea unui randament cît mai bun, distanţa dintre inductor şi semifabricat trebuie să fie cît mai mică, suficientă însă pentru a asigura rezistenţa mecanică a stratului de izolaţie termică. Spre a se evita uzarea rapidă prin frecare a izolaţiei termice din cauza deplasării pieselor, se folosesc ghidaje din ţevi răcite cu apă. După modul de funcţionare instalaţiile de încălzire în volum pot fi cu funcţionare intermitentă sau continuă, cu sau fără atmosferă de protecţie.

Timpul de încălzire. Căldura produsă în stratul de grosime δ_2 (adîncimea de pătrundere în piesă) se transmite prin conducţie în restul semifabricatului. Dacă puterea activă S_{oa} pe unitatea de suprafaţă a piesei are valoare redusă, timpul de încălzire va fi mărit, iar temperatura va fi uniform distribuită în piesă; în cazul în care S_{oa} are valoare mare, piesa se va încălzi mai rapid, însă diferenţa de temperatură între stratul încălzit, de la suprafaţa

piesei și interiorul acesteia, va atinge valori ridicate. Diferența de temperatură dintre stratul cel mai cald și cel mai rece al piesei fiind limitată din considerente tehnologice la 50...100°C (la sfîrșitul încălzirii) puterea S_{oa} va fi limitată superior la circa 0,5 kW/cm², iar timpul de încălzire va fi limitat inferior. Valorile minime ale timpului de încălzire, stabilite pe baze experimentale, pot fi calculate în mod orientativ cu relațiile [48]:

$$t = 4\ d_2^2\ \text{[s]}, \tag{3.230}$$

pentru semifabricate cilindrice avînd diametrul d_2 (în cm), sau

$$t = 5\ b_2^2\ \text{[s]}, \tag{3.231}$$

pentru semifabricate dreptunghiulare avînd latura mică b_2 (în cm) a secțiunii.

Frecvența de lucru. Frecvența optimă de lucru pentru o anumită piesă depinde de randamentul instalației de încălzire și de uniformitatea încălzirii.

Variația randamentului electric a fost analizată în § 3.3.3; cu creșterea frecvenței de lucru, încălzirea va avea un caracter de suprafață, ceea ce majorează pierderile de căldură și deci micșorează randamentul termic. Din figura 3.83 se observă că randamentul total are valori mari pentru $x_2 = 2\ \ldots\ 4{,}5$, adică pentru

$$\frac{d_2}{\delta_2} = 2{,}5\ \ldots\ 6{,}0; \tag{3.232}$$

în cazul pieselor de secțiune dreptunghiulară, diametrul d_2 se înlocuiește cu latura mică a secțiunii. Adîncimea de pătrundere δ_2 se calculează pentru temperatura finală a semifabricatului

Pentru un diametru dat al piesei, această relație stabilește domeniul

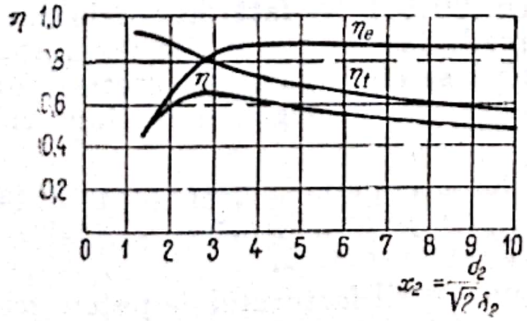


Fig. 3.83. Randamentul electric η_e, termic η_t și total η, în funcție de x_2 la încălzirea pieselor cilindrice de oțel.

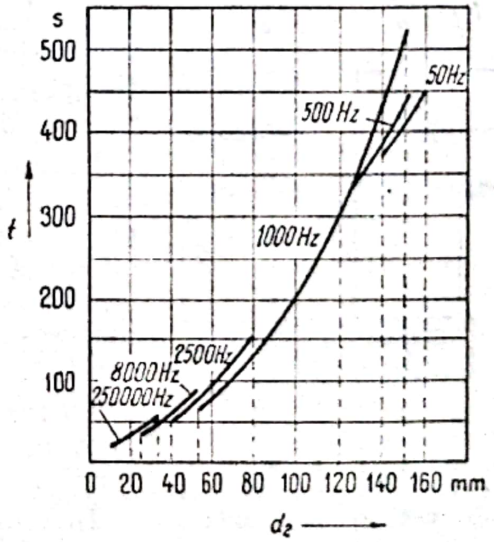


Fig. 3.84. Dependența timp de încălzire — frecvență de lucru — diametru pentru semifabricate de oțel.

Tabela 3.22

Frecvenţa de lucru la încălzirea semifabricatelor din metale neferoase [50]

Diametrul d_1, mm			Frecvenţa Hz
Cupru	Aluminiu	Alamă	
1,5...7	2... 8	2,5...10	(100...200)10³
7...12	8...15	10...18	8000
12...18	15...22	18...25	2500
18...70	22...85	25...100	1000
70	85	100	50

frecvenţelor de lucru pentru care instalaţia de încălzire are maximum de randament.

Dependenţa timp de încălzire-frecvenţă-diametrul piesei (pentru oţel), stabilită pentru a realiza uniformitatea impusă a temperaturilor, este indicată în figura 3.84; frecvenţele de lucru pentru semifabricate din metale neferoase sînt indicate în tabela 3.22. Dacă frecvenţa de lucru este mai mică decît cea dată de relaţia (3.232), piesa se comportă ca şi cînd ar fi „transparentă" faţă de cîmpul electromagnetic, absorbind numai o parte din energia acestuia; dacă frecvenţa depăşeşte valoarea optimă, căldura se dezvoltă la suprafaţa piesei, ceea ce conduce la un timp de încălzire mare şi la pierderi de căldură majorate.

Calculul instalaţiei de încălzire în volum se efectuează ca şi cel al cuptoarelor electrice de inducţie cu creuzet (§ 3.3.6), deosebirile constînd numai în privinţa alegerii frecvenţei de lucru, a timpului de încălzire şi a dimensiunilor inductorului:

— diametrul $d_1 = (1{,}1...1{,}4)d_2$; (3.233)

— lungimea $h_1 = h_2 + (1...2)d_1$. (3.234)

După alegerea mărimilor care caracterizează sursa de alimentare şi după determinarea parametrilor sistemului inductor-piesă, se stabilesc valorile randamentului şi a consumului specific de energie.

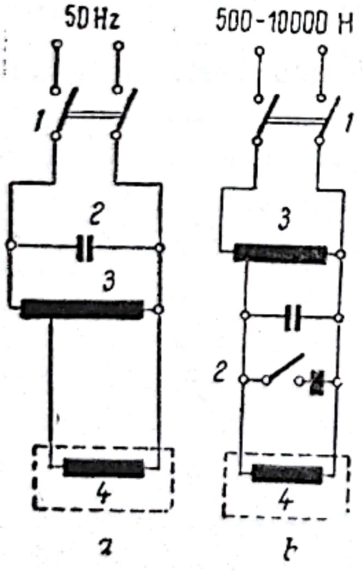


Fig. 3.85. Schema electrică de alimentare a instalaţiei de încălzire în volum:

a — la frecvenţă industrială; *b* — la medie frecvenţă. *1* — întreruptor; *2* — condensatoare; *3* — autotransformator; *4* — inductor.

Echipamentul electric (fig. 3.85). Sursele de alimentare utilizate sînt: reţeaua de frecvenţă industrială, multiplicatoarele cu miezuri feromagnetice, generatoarele rotative de frecvenţă şi convertoarele de frecvenţă cu tiristoare.

Puterea absorbită în timpul încălzirii pieselor de oţel variază mult: pînă în jurul punctului Curie, puterea creşte cu 20...30% faţă de cea iniţială, iar după aceea scade la 40...60% din cea iniţială. Variaţia puterii se obţine cu un autotransformator sau transformator cu reglarea tensiunii sub sarcină.

La metalele neferoase, puterea creşte puţin în raport cu mărirea temperaturii, astfel că reglarea tensiunii nu mai este necesară.

În scopul îmbunătăţirii factorului de putere scăzut (0,1...0,3) se folosesc baterii de condensatoare.

Exemplu. În tabela 3.23 este dat un exemplu de proiectare a inductorului necesar încălzirii pentru

Tabela 3.23

Exemplu de calcul al unui inductor pentru încălzirea în volum

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Frecvența de lucru	fig. 3.84		$f = 1000$ Hz
Timpul de încălzire	fig. 3.84		$t_t = 200$ sec $= 0{,}055$ h
Adîncimea de pătrundere	$\rho = 130 \cdot 10^{-8}$ Ωm	$\delta_2 = 503\sqrt{\frac{130 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 1000}}$	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$m = $= 1{,}9$ cm
Verificarea relației (3.232)		$\frac{d_2}{\delta_2} = \frac{10}{1{,}9}$	5,26
Dimensiunile inductorului	(3.233) (3.234)	$d_1 = (1{,}1 \ldots 1{,}4) \cdot 10$ $h_1 = 40 + (1 \ldots 2) \cdot 12$	12 cm 60 cm
Masa piesei	$m = \rho' \cdot V$	$m = 7{,}2\left(\frac{\pi \cdot 1^2}{4} 4\right)$	22,6 kg
Energia specifică	fig. 3.2		$i = 0{,}21$ kWh/kg
Puterea utilă	(3.4)	$P_u = \frac{22{,}6 \cdot 0{,}21}{0{,}055}$	86,5 kW
Randamentul termic și total adoptat	3.1.3. (apreciere)		$\eta_t = 0{,}8$ $\eta = 0{,}6$
Puterea de racordare la rețea	$P = \frac{P_u}{\eta}$	$P = \frac{86{,}5}{0{,}6}$	144 kW
Generatorul ales	Generator rotativ de medie frecvență: $P_g = 150$ kW, $U_g = 750$ V, $f_g = 1000$ Hz.		
Parametrii sistemului inductor ($N = 1$) — piesă	analog tab. 3.19		$(R_1)_1 = (X_1)_1 = 9 \cdot 10^{-6}$ Ω $R_2 = 46 \cdot 10^{-6}$ Ω $X_2 = 56 \cdot 10^{-6}$ Ω $(X_I)_1 = 136 \cdot 10^{-6}$ Ω $X_{II} = 14 \cdot 10^{-6}$ Ω $\xi = 0{,}52$ $(R)_1 = 33 \cdot 10^{-6}$ Ω $(X_1) = 167 \cdot 10^{-6}$ Ω
Randamentul electric	(3.178)	$\eta_e = \frac{0{,}52 \cdot 46}{33}$	0,725
Factorul de putere	(3.179)	$\cos \varphi = \frac{33}{167}$	0,196

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.23 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Solenaţia inductorului	(3.181)	$(NI_1) = \sqrt{\frac{144 \cdot 10^{-3}}{33 \cdot 10^{-6}}}$	66 000 Asp
Puterea aparentă a inductorului	(3.184)	$S = \frac{144}{0{,}196}$	734 kVA
Curentul absorbit	$I_1 = \frac{S}{U_1}$	$I_1 = \frac{734 \cdot 10^3}{750}$	975 A
Numărul de spire al inductorului	$N = \frac{(NI_1)}{I_1}$	$N = \frac{66\,000}{975}$	68
Randamentul total calculat	(3.1)	$\eta = 0{,}8 \cdot 0{,}725$	0,58
Consumul specific de energie electrică	(3.8)	$Q_s = \frac{0{,}21}{0{,}58} \cdot 10^3$	360 kWh/t

forjare $\theta = 1000$ °C a unei piese cilindrice de oţel OL 45, cu dimensiunile $d_2 = 0{,}1$ m, $h_2 = 1{,}6$ m.

3.3.12. Călirea superficială a metalelor

Călirea superficială are scopul de a mări duritatea într-un strat superficial, păstrînd proprietăţile maleabile ale metalului în interior. Maleabilitatea miezului metalului face ca acesta să reziste la sarcini dinamice, ceea ce nu este posibil întotdeauna, cînd piesele sînt călite pe toată grosimea.

Călirea prin inducţie constă în încălzirea prin curenţi de înaltă frecvenţă a stratului superficial al piesei din oţel (cu 0,3...0,8% C) introdusă într-un inductor, urmată de răcirea rapidă în aer, apă sau ulei. Procedeele de călire se clasifică în:

— călire simultană (fig. 3.86, *a*), care constă în încălzirea întregii suprafeţe a piesei, urmată de răcirea acesteia — de exemplu călirea fusurilor, flanşelor, bucşelor, roţilor dinţate;

— călire simultană — succesivă (fig. 3.86, *b*), caracterizată prin aceea că diferitele porţiuni ale piesei sînt supuse pe rînd călirii, piesa deplasîndu-se sacadat faţă de inductor — călirea roţilor dinţate, a arborilor etc.;

— călirea continuă-succesivă (fig. 3.86, *c*), la care piesa se deplasează continuu faţă de inductor, sau invers.

Durata încălzirii, de obicei de ordinul fracţiunilor de secundă, depinde de puterea S_{oa} pe unitatea de suprafaţă a piesei, care are valori între 2 şi 10 kW/cm².

Avantajele călirii prin curenţi de înaltă frecvenţă sînt:

— timpul de călire redus, deci productivitate mare;

— adîncimea de călire este controlabilă;

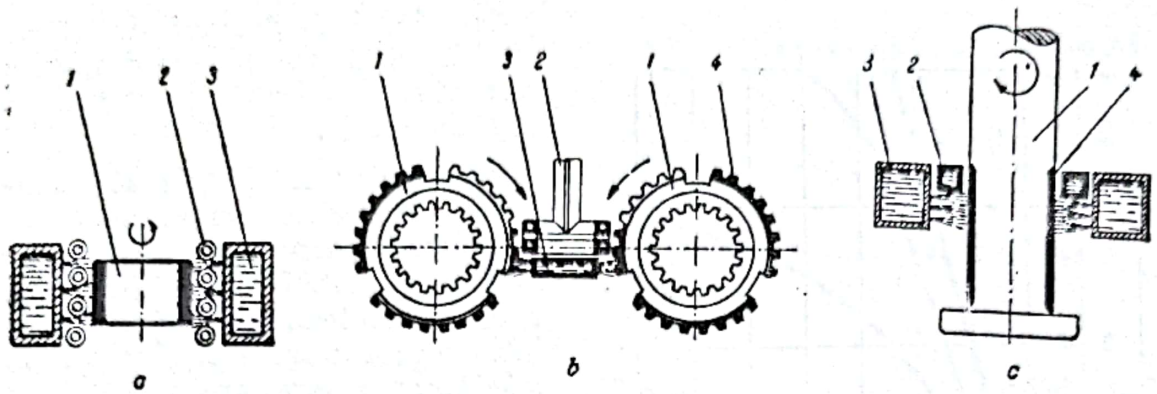


Fig. 3.86. Călire superficială simultană *a*, simultană succesivă a roților dințate *b* și continuă — succesivă *c*:
1 — piesă; *2* — inductor; *3* — dispozitiv de răcire; *4* — zona călită.

— regimul termic poate fi controlat în cazul formelor variate ale pieselor;
— instalația de călire ocupă o suprafață redusă.

Din punct de vedere constructiv, inductoarele de călire se realizează cu una sau mai multe spire, de forme foarte diferite, depinzînd de profilul pieselor ce urmează a fi călite.

Frecvența de lucru depinde de mărimea adîncimii de pătrundere δ_2 a curentului în piesă și de grosimea Δ a stratului ce urmează a fi călit. Astfel:

— dacă $\delta_2 \leqslant \Delta$, încălzirea stratului Δ are loc prin conducție termică și pentru ca suprafața piesei să nu fie arsă, timpul de încălzire trebuie să fie mare, iar puterea pe unitatea de suprafață redusă;
— dacă $\delta_2 > \Delta$, conducția termică nu are importanță și timpul de încălzire poate fi redus, iar puterea pe unitatea de suprafață mărită.

Pe baza experienței în domeniul călirii, frecvența optimă de lucru se alege cu ajutorul relației

$$\Delta < \delta_2 < 4\Delta; \tag{3.235}$$

ținînd cont de randamentul electric (§ 3.3.3), se impune limitarea inferioară a frecvenței, exprimată de condiția

$$\frac{d_2'}{\delta_2} \geqslant 3{,}5 , \tag{3.236}$$

d_2 fiind diametrul piesei de călit.

Calculul puterii pe unitatea de suprafață și a timpului de încălzire este complicat, recurgîndu-se de aceea la diagrame construite pentru o anumită frecvență (fig. 3.87).

Puterea sursei de alimentare este

$$P_g = S_{oa} \cdot A \quad [\text{kW}], \tag{3.237}$$

în care A este suprafața călită.

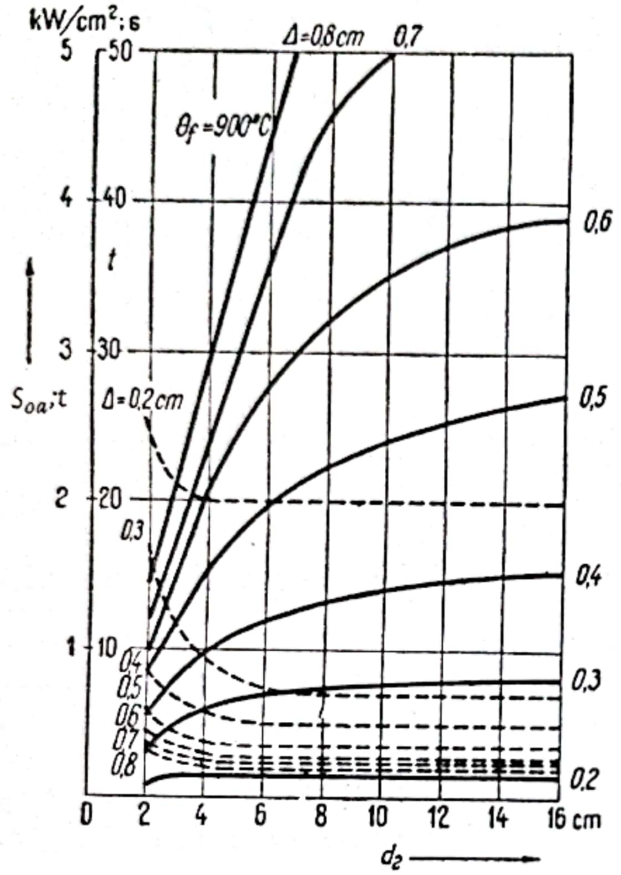


Fig. 3.87. Diagrama timp de încălzire t (linia continuă) — grosimea stratului călit Δ — puterea pe unitatea de suprafaţă S_{oa} (linia întreruptă) — diametrul d_2 al piesei la $\theta_f = 900°C$, pentru frecvenţa de 8 000 Hz a sursei de alimentare.

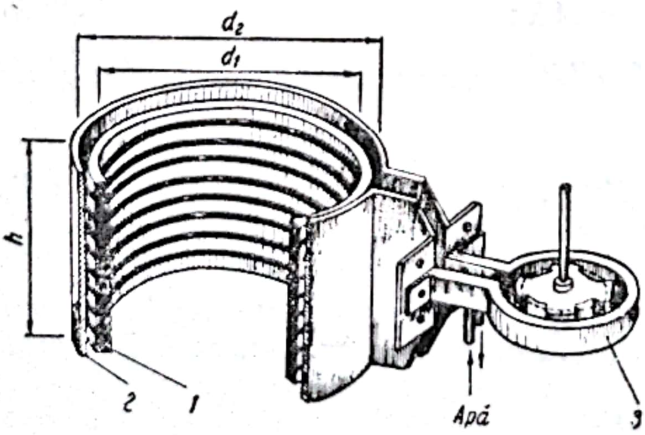


Fig. 3.88. Transformator de adaptare fără miez feromagnetic:
1 — înfăşurarea primară; *2* — înfăşurarea secundară; *3* — inductorul; *4* — piesa.

Calculul inductorului de călire este destul de complex şi din acest motiv se apelează la încercări experimentale.

Echipamentul electric al instalaţiei de călire superficială se compune dintr-un generator de medie sau înaltă frecvenţă (fig. 3.63) care alimentează inductorul prin intermediul unui *transformator de adaptare;* acesta are rolul de a transmite puterea de la sursa de alimentare la sarcină, cu un randament cît mai bun, transformînd impedanţa sarcinii (sistemul inductor-piesă) într-o impedantă corespunzătoare generatorului.

Tensiunea surselor de medie frecvenţă, de circa 750...1 500 V sau de înaltă frecvenţă — 10...15 kV, este transformată în tensiunea joasă de 20...50 V necesară călirii; transformatorul de adaptare avînd raportul de transformare variabil va permite şi utilizarea diferitelor tipuri de inductoare.

Din punct de vedere constructiv, transformatoarele de adaptare se construiesc cu miez feromagnetic, pentru frecvenţele ce nu depăşesc 10 000 Hz (de exemplu, transformatorul de călire tip TMC — 8000/III fabricat în ţara noastră, pentru 8 000 Hz, 700 kVA, tensiunea primară 750 V, tensiunea secundară reglabilă între 23 şi 75 V), şi fără miez feromagnetic, la frecvenţele mai mari de 10 000 Hz (fig. 3.88). Pierderile în fier şi cupru sînt mai mari ca la transformatoarele normale, ceea ce implică necesitatea răcirii cu apă a miezului feromagnetic şi a bobinajului. Înfăşurarea secundară este construită dintr-o singură spiră, legată direct la inductorul de călire.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru schema electrică echivalentă (fig. 3.89) a transformatorului de adaptare fără miez feromagnetic, conform teoremei a II-a Kirchhoff:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\underline{I}_1 - j\omega M\underline{I}_2 \tag{3.238}$$

$$0 = [R_2 + R_i + j\omega(L_2 + L_i)]\underline{I}_2 - j\omega M\underline{I}_1,$$

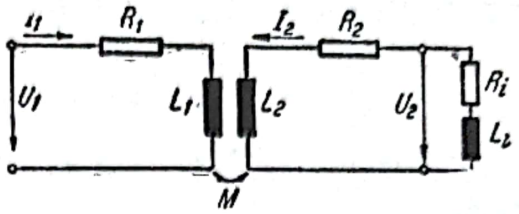


Fig. 3.89. Schema electrică echivalentă a transformatorului de adaptare.

în care cu indicele i s-au notat parametrii instalației de călire.
Din aceste ecuații rezultă impedanța totală a schemei

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = R_1 + p^2(R_2 + R_i) + j\omega[L_1 - p^2(L_2 + L_i)], \tag{3.239}$$

în care

$$p^2 = N^2\xi = N^2 \frac{\left(\frac{\alpha_M}{\alpha_2}\right)^2}{1 + \frac{(R_2+R_i)^2}{\omega^2 (L_2 + L_i)^2}}, \tag{3.240}$$

N fiind numărul de spire al înfășurării primare.
Deoarece la frecvențe înalte

$$R_2 + R_i \ll \omega (L_2 + L_i),$$

impedanța este egală cu reactanța totală

$$Z \simeq X = \omega L = \omega[p^2(L_2 + L_i) - L_1]. \tag{3.241}$$

Pentru ca randamentul electric să fie maxim trebuie ca

$$L_2 \simeq 0{,}8\, L_i. \tag{3.242}$$

Inductivitatea secundarului (rel. 3.148) este

$$L_2 = \mu_0 \frac{\pi d_2^2}{4h} \alpha_2, \tag{3.243}$$

și alegînd raportul $m_2 = d_2/h = 1 \ldots 1{,}2$, din relațiile (3.242) și (3.243) rezultă dimensiunile d_2 și h ale spirei secundare.
Diametrul înfășurării primare este

$$d_1 = d_2 - 2\Delta,$$

în care $\Delta = 15 \ldots 20$ mm este distanța dintre primar și secundar; înălțimea este egală cu cea a spirei secundare.

Scanned with OKEN Scanner

Inductivitatea primarului (rel. 3.147) este

$$L_1 = N^2 \mu_0 \frac{\pi d_1^2}{4h} \alpha_1 = N^2 (L_1)_1, \tag{3.244}$$

în care $(L_1)_1$ este inductivitatea înfăşurării primare redusă la o singură spiră.

Inductivitatea totală din relaţiile (3.241) şi (3.242)

$$L = N^2 [1{,}8\ \xi L_i - (L_1)_1] \tag{3.245}$$

permite determinarea numărului de spire al înfăşurării primare

$$N = \sqrt{\frac{L}{1{,}8\ \xi L_i - (L_1)_1}}, \tag{3.246}$$

inductivitatea L_i a sistemului inductor-piesă fiind cunoscută, iar inductivitatea totală L impusă de generatorul de alimentare.

Exemplu. Să se calculeze transformatorul de adaptare fără miez feromagnetic, al instalaţiei de călire avînd inductivitatea $L_i = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ H, la un generator electronic, avînd inductivitatea de sarcină $L = 6 \cdot 10^{-6}$ H.

Calculele sînt cuprinse în tabela 3.24.

Tabela 3.24

Exemplu de calcul al transformatorului de adaptare fără miez feromagnetic al unei instalaţii de călire

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Inductivitatea secundarului	(3.242)	$L_2 \simeq 0{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}$	$0{,}4 \cdot 10^{-6}$ H
m_2	$m_2 = d_2/h$	$m_2 = 1 \ldots 1{,}2$	1,1
Factorul de corecţie α_2	tab. 3.14		0,667
Dimensiunile spirei secundare	$d_2 = \frac{4L_2}{\mu_0 \pi \alpha_2 m_2}$	$d_2 = \frac{4 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0{,}667 \cdot 1{,}1}$ $h = \frac{0{,}67}{1{,}1}$	0,67 m 0,61 m
Diametrul înfăşurării primare	(3.243) $\Delta = 0{,}02$ m	$d_1 = 0{,}67 - 2 \cdot 0{,}02$	0,63 m
Factorii de corecţie α_1, α_M	tab. 3.14	$d_1/h = 0{,}63/0{,}61 = 1{,}03$	$\alpha_1 = 0{,}68$ $\alpha_M = 0{,}62$

Tabela 3.24 (în continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Raportul de transformare ($N = 1$)	(3.240)	$\xi = \left(\frac{0,62}{0,667}\right)^2$	0,857
Inductivitatea primarului redus la o spiră.	(3.244)	$(L_1)_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4 \cdot 0,61} \cdot 0,68$	$0,44 \cdot 10^{-6}$ H
Numărul de spire al înfăşurării primare	(3.246)	$N = \sqrt{\frac{6 \cdot 10^{-6}}{1,8 \cdot 0,857 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} - 0,44 \cdot 10^{-6}}}$	5 sp

3.4. ÎNCĂLZIREA DIELECTRICĂ

Încălzirea dielectrică (capacitivă) se utilizează pentru tratamentul termic al materialelor dielectrice: uscarea materialelor fibroase (hîrtie, lemn, plăci aglomerate din lemn), a miezurilor de turnătorie, lipirea şi sudarea materialelor plastice, uscarea şi sterilizarea produselor alimentare şi farmaceutice.

În instalaţiile de încălzire dielectrică materialul de încălzit se pune între plăcile unui condensator de lucru (fig. 3.1, *d*) alimentat de către un generator de înaltă frecvenţă. Încălzirea se bazează pe pierderile de putere datorite atît faptului că dielectricul nu este perfect izolant- prezentînd o conductanţă finită şi deci pierderi prin conducţie, cît şi pierderilor prin isterezis, datorate fenomenului de isterezis dielectric.

Pierderile prin isterezis apar datorită faptului că orientarea dipolilor electrici moleculari ai dielectricului nu poate urmări variaţiile de sens ale cîmpului electric alternativ aplicat, deoarece orientării i se opune agitaţia termică — fenomenul de vîscozitate electrică; acest fenomen determină transformarea energiei electrice a cîmpului în energie termică. Cantitatea de căldură dezvoltată în unitatea de timp este cu atît mai mare cu cît este mai mare frecvenţa cîmpului electric.

Avantajele încălzirii dielectrice, care rezultă din principiul acestui procedeu, sînt următoarele:

— căldura se dezvoltă în dielectricul care urmează a fi încălzit rezultînd o distribuţie uniformă a temperaturii, distribuţie care nu se poate obţine la încălzirea din exterior prin conducţie, radiaţie sau convecţie, deoarece dielectricii sînt materiale rău conductoare de căldură;

— timpul necesar încălzirii este redus, deci productivitatea instalaţiei este mărită.

Schema electrică echivalentă a condensatorului cu pierderi constă dintr-un condensator ideal C, legat în paralel cu rezistorul R (fig. 3.90, *a*).

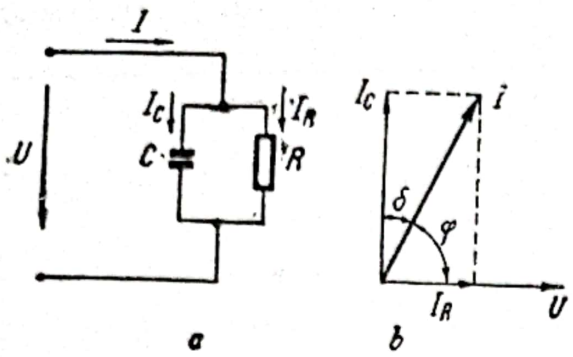


Fig. 3.90. Condensatorul cu pierderi:
a — schema electrică echivalentă; *b* — diagrama fazorială.

Puterea transformată în căldură este

$$P = UI \cos \varphi ; \qquad (3.247)$$

notînd cu δ unghiul de pierderi din figura 3.90, *b*, rezultă $\cos \varphi = \sin \delta \simeq \simeq \operatorname{tg} \delta$, $\operatorname{tg} \delta$ reprezentînd factorul de pierderi al dielectricului şi cu aproximaţia

$$I \simeq I_c = U \omega C, \qquad (3.248)$$

relaţia (3.247) devine

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad [\mathrm{W}], \qquad (3.249)$$

în care: U este valoarea eficace a tensiunii aplicate condensatorului, în V;
$\omega = 2\pi f$ — pulsaţia, în 1/s;
C — capacitatea condensatorului, în F.

Capacitatea condensatorului plan este exprimată de relaţia

$$C = \varepsilon \frac{A}{l}, \qquad (3.250)$$

unde $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ este permitivitatea dielectricului;
$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m — permitivitatea vidului;
ε_r — permitivitatea relativă a dielectricului;
A — suprafaţa plăcilor condensatorului, în m^2;
l — distanţa între plăcile condensatorului, în m.

Înlocuind în relaţia (3.249) tensiunea U exprimată în funcţie de intensitatea cîmpului electric E (în V/m) dintre plăci

$$U = El, \qquad (3.251)$$

capacitatea (rel. 3.250) şi volumul dielectricului

$$V = Al \quad [\mathrm{m}^3], \qquad (3.252)$$

se obţine puterea

$$P = 2\pi f \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot VE^2 \qquad [\mathrm{W}]. \qquad (3.253)$$

Puterea dezvoltată în unitatea de volum a dielectricului este

$$p = \frac{P}{V} = 2\pi f \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 \qquad [\mathrm{W/m}^3]; \qquad (3.254)$$

ţinînd cont de faptul că produsul $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ reprezintă o constantă de material, iar E nu poate depăşi o valoare limită (10^5 V/m) din punct de vedere al

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.25

Date orientative referitoare la încălzirea dielectrică a materialelor [3]

Materialul	Frecvența MHz	Puterea pe unitatea de volum p W/cm³	Intensitatea cîmpului electric E V/cm	Volumul încărcăturii V	Durata tratamentului t
Lemn (uscare)	0,3...0,75	0,008...0,05	50...400	3...15 m³	8 ... 30 h
Lemn (incleiere)	0,5...0,7	0,02...0,05	400...700	pînă la 1 m³	10...20 min
Plăci aglomerate din lemn	—	0,5 ...0,8	300...600	0,1...0,7 m³	2...14 min
Miezuri de turnătorie (uscare)	6...50	1 ...3	200...800	pînă la 50 kg	2...20 min
Semințe (uscare în vid)	10...12	0,08...0,09	50...100	pînă la 250 kg	0,75..1,2 h
Vulcanizarea cauciucurilor	5...10	1,4...5	200...700	10...30 kg	4...8 min
Hîrtie în baloturi (uscare)	20...30	3...5	300...800	10...500 kg	0,25...3 h
Hîrtie, foi (uscare)	20...30	100...500	200...5700	0,1...1 m²	5...40 sec
Conserve de fructe (sterilizare)	25...35	3...7	250...300	12...0,5 kg	40...110 sec
Policlorură de vinil (sudare)	50...75	100...600	1000...10000	0,1...0,5 m	0,5...20 sec
Material plastic (sudare cu role)	40...200	1000 ...1500	3000...30000	$(3...10)10^{-3}$ kg	0,03... 0,2 sec

Scanned with OKEN Scanner

conturnării, rezultă că puterea p poate fi mărită numai prin utilizarea frecvenţelor înalte de 0,05 ...200 MHz.

Deoarece în cazul proceselor de uscare temperatura finală nu depăşeşte 150°C, pierderile termice prin conducţie, convecţie şi radiaţie sînt neglijabile, ceea ce permite determinarea puterii necesare încălzirii materialului

$$P = \frac{Q}{t}, \tag{3.255}$$

în care Q (în J) este cantitatea de căldură necesară încălzirii la temperatura impusă (rel. 3.3 sau rel. 3.61), iar t (în secunde) — timpul de încălzire, indicat în tabela 3.25 pentru diferite materiale.

Caracteristicile generatorului de frecvenţă adică frecvenţa f şi puterea P, se determină din relaţiile (3.254) şi (3.255) iar tensiunea U din relaţia (3.251); pentru calcule se pot utiliza datele orientative indicate în tabela 3.25.

Generatoarele de înaltă frecvenţă sînt oscilatoare electronice (§ 3.3.4) de putere 0,1 ... 200 kW. Permitivitatea şi factorul de pierderi variază cu temperatura, ceea ce conduce la modificarea puterii absorbite de material în timpul încălzirii; pentru ca generatorul să aibă un regim invariabil de funcţionare se procedează la acordarea sarcinii cu ajutorul unor bobine avînd inductivitatea reglabilă şi condensatoare cu capacitatea variabilă, introduse în circuitul condensatorului de lucru.

3.5. CUPTOARE ELECTRICE CU ARC

Încălzirea materialelor în cuptoare electrice cu arc se bazează pe cantitatea de căldură dezvoltată în arcul electric stabilit între electrozi solizi sau lichizi, separaţi de un mediu gazos ionizat, în prezenţa unei tensiuni electrice corespunzătoare.

După modul de producere şi de transmitere a căldurii, aceste cuptoare sînt:

— cu acţiune directă;
— cu acţiune indirectă;
— cu arc şi rezistenţă.

La *cuptoarele cu acţiune directă* arcul electric se produce între electrozi şi metalul de topit (fig. 3.1, *e*), căldura dezvoltată în arc transmiţîndu-se şarjei prin radiaţie şi conducţie termică. Temperatura ridicată a arcului electric permite utilizarea acestor cuptoare pentru topirea oţelului (în special a oţelurilor aliate); avantajul principal faţă de covertizoarele cu insuflare de oxigen utilizate în oţelăriile moderne, constînd în posibilitatea încărcării cuptorului numai cu deşeuri de fier vechi.

În cuptoarele cu arc electric în vid se topesc metalele şi aliajele greu fuzibile, active din punct de vedere chimic (zirconiu, titan, molibden, etc).

La *cuptoarele cu acţiune indirectă* căldura arcului electric stabilit între doi electrozi (fig. 3.1 *f*) se transmite prin radiaţie materialului ce formează şarja. Utilizarea acestor cuptoare este limitată la topirea neferoaselor (în

special a cuprului şi aliajelor sale) şi a fontei, datorită temperaturilor ce nu pot depăşi 1 400 °C, ca urmare a densităţilor reduse de curent suportate de electrozii aşezaţi orizontal şi supuşi la încovoiere.

La *cuptoarele cu arc şi rezistenţă*, electrozii sînt scufundaţi în masa materialului de topit (fig. 3.102), care are o rezistenţă electrică suficient de mare. Încălzirea este produsă atît de căldura dezvoltată în arc cît şi în rezistenţa materialului. Temperatura arcului fiind ridicată şi căptuşeala refractară a cuptorului fiind protejată de către materialul şarjei, cuptoarele de acest tip pot fi construite pentru puteri foarte mari; se utilizează pentru obţinerea de materiale prin procese termochimice, cum sînt: grafitarea electrozilor, producerea carburii de calciu, a feroaliajelor (din minereuri), a abrazivelor, carborundului etc.

3.5.1. Arcul electric

Arcul electric este o descărcare electrică autonomă caracterizată printr-o mare densitate de curent stabilită la valori reduse ale tensiunii pe arc. Descărcarea autonomă în gaze sau vapori metalici este determinată de ionizarea continuă a acestora, produsă de electronii emişi de electrozii încălziţi prin trecerea curentului electric.

Caracteristicile tensiune U_a — curent I_a ale arcului electric. Caracteristica statică a arcului exprimă totalitatea punctelor de echilibru staţionar pe care le poate lua descărcarea în arc (fig. 3.91, *a*). Caracteristica statică se referă la arcul de curent continuu; în curent alternativ această caracteristică reprezintă variaţia valorilor eficace ale tensiunii şi curentului arcului.

Caracteristica dinamică este strîns legată de variaţii rapide ale curentului (cazul curentului alternativ), care nu mai sînt urmărite fidel de tensiune, deoarece stările termice din descărcare prezintă inerţie, ceea ce se reflectă prin tensiuni diferite pe arc. Din figura 3.91, *b* se observă caracteristicile arcului de curent alternativ;

— curentul trece de două ori prin valoarea zero în timpul unei perioade de variaţie a tensiunii, adică arcul se stinge (la valoarea U_{st} a tensiunii) şi se reaprinde (la valoarea U_{am}) de $2f$ ori pe secundă, f fiind frecvenţa tensiunii de alimentare;

— arcul electric este o rezistenţă neliniară, ceea ce de-

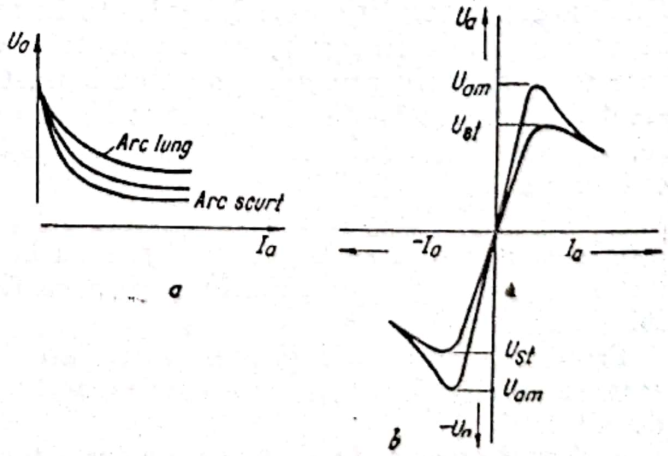


Fig. 3.91. Caracteristicile tensiune-curent ale arcului electric:
a — caracteristica statică pentru diferite distanţe între electrozi;
b — caracteristica dinamică.

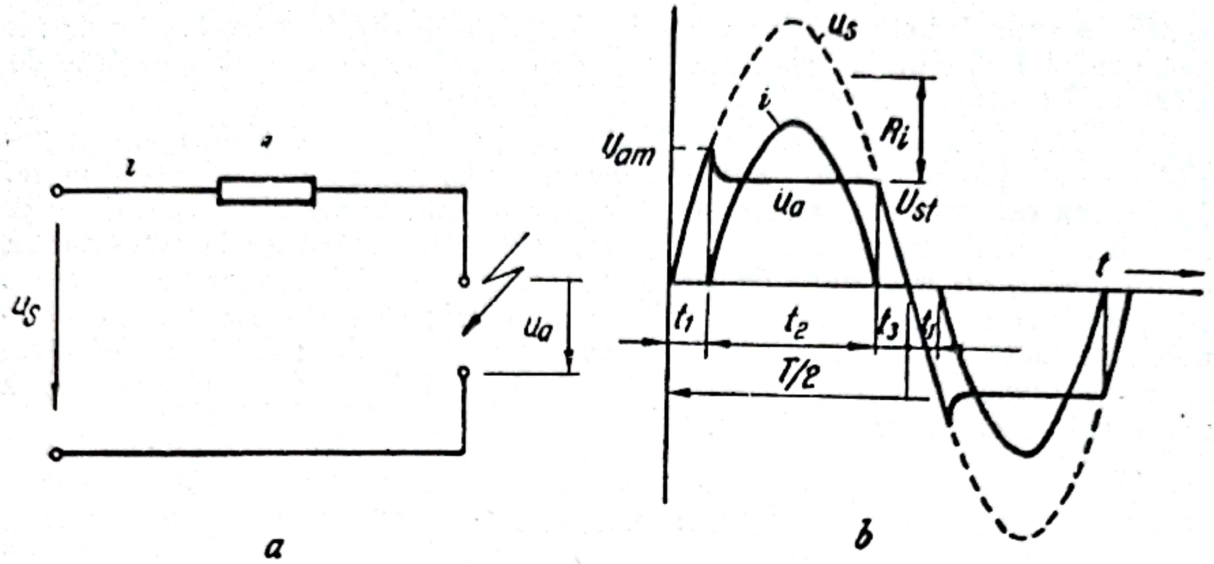


Fig. 3.92. Arcul electric în serie cu un rezistor:
a — circuitul electric; *b* — variația în timp a tensiunii sursei u_s, tensiunii arcului u_a și a curentului din arc i.

termină variația nesinusoidală a tensiunii și curentului arcului, deci caracterul deformant al arcului electric.

Stabilitatea arcului electric de curent alternativ. La trecerea curentului electric prin zero, temperatura spațiului arcului se micșorează, ceea ce conduce la deionizarea acestuia. Pentru reaprinderea arcului este necesar ca tensiunea să atingă o valoarea mai ridicată decît tensiunea normală $U_{am} > U_a$, U_{am} fiind tensiunea de amorsare (aprindere) a arcului. Deoarece și tensiunea u_s a sursei de alimentare variază în timp, pentru reaprinderea arcului este necesar ca

$$u_s \geqslant U_{am}. \tag{3.256}$$

Dacă această condiție este îndeplinită în momentul stingerii arcului, acesta se va reaprinde imediat; în caz contrar va trece un interval de timp în care curentul prin arc are valoarea zero. O dată cu mărirea acestei pauze, efectul deionizant este accentuat și U_{am} va crește. Dacă pauza este prea mare, valoarea tensiunii de amorsare depășește pe cea a tensiunii sursei și arcul se va stinge definitiv.

Pentru stabilizarea arcului de curent alternativ este, deci, necesar ca lungimea acestuia să fie cît mai redusă iar curentul prin arc să aibă o valoare cît mai mare, obținîndu-se pe această cale ionizarea intensă a spațiului de arc.

Problema amorsării și stabilității arcului electric este strîns legată de caracterul circuitului în care este încadrat arcul și de caracteristicile sursei de alimentare.

a. **Arcul electric în serie cu un rezistor R** (fig. 3.29). Pentru circuitul din figura 3.92, *a*, conform teoremei a doua a lui Kirchhoff

$$0 = Ri + u_a - u_s. \tag{3.257}$$

Pentru o durată de timp mai scurtă decît t_1 (fig. 3.92, *b*), arcul este stins. În momentul t_1, tensiunea sursei ajunge egală cu tensiunea de amorsare a arcului ($u_s = U_{am}$), deci se produce aprinderea arcului. În intervalul de timp t_2, tensiunea pe arc se poate considera constantă $u_a \simeq U_{am} \simeq U_{st}$, deoarece curentul prin arcul cuptorului are valori foarte ridicate. În momentul t_3 se va produce stingerea arcului, tensiunea sursei scăzînd sub valoarea tensiunii de stingere a arcului U_{st}.

Rezultă că arcul electric în serie cu un rezistor va arde cu pauze, avînd efecte nefavorabile asupra stabilităţii, iar datorită deformării pronunţate a tensiunii şi curentului din arc, factorul de putere va fi relativ scăzut ($K = 0{,}75 \ldots 0{,}85$).

b. **Arcul electric în serie cu o bobină L** (fig. 3.93). Ecuaţia circuitului din figura 3.93,*a* este

$$-L\frac{pi}{dt} = u_a - u_s. \tag{3.258}$$

Datorită inductivităţii L a bobinei, curentul din arc aste defazat în urma tensiunii de alimentare u_s cu unghiul φ. Dacă la $t = 0$ condiţia (3.256) este satisfăcută, arcul se reaprinde instantaneu. Lipsa pauzelor de curent se explică prin aceea că la trecerea tensiunii u_s prin zero, curentul prin arc este menţinut datorită tensiunii de autoinducţie care apare la bornele bobinei L, tensiune a cărei valoare depăşeşte pe cea a tensiunii de amorsare.

La o valoare suficient de mare a inductivităţii, se poate realiza un defazaj potrivit între u_s şi i, ca atunci cînd curentul trece prin zero,

$$U_{s\,max} \cdot \sin\varphi \geqslant U_{am}. \tag{3.259}$$

În lucrarea [3] se demonstrează că trecerea continuă a curentului printr-un arc electric este posibilă pentru un factor de putere

$$\cos\varphi \leqslant 0{,}85 \tag{3.260}$$

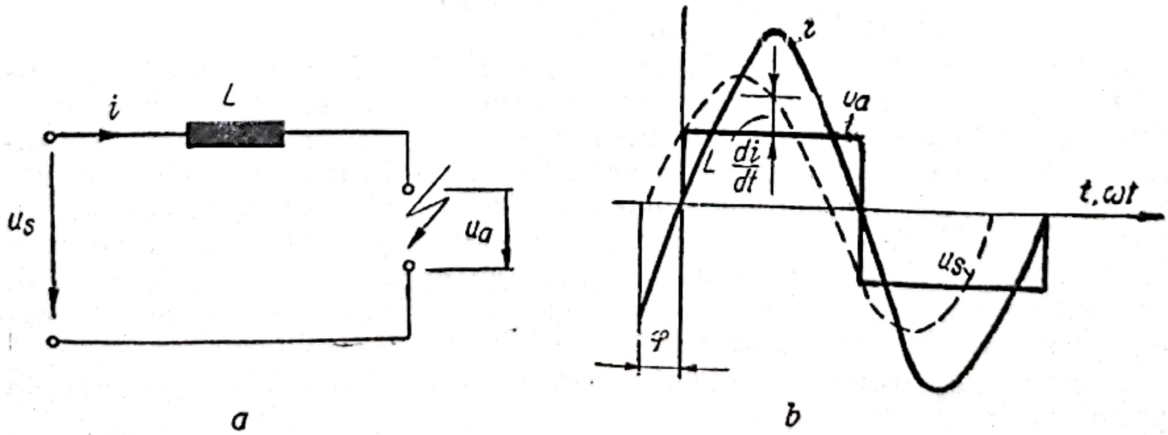


Fig. 3.93. Arcul electric în serie cu o inductivitate:
a – circuitul electric; *b* – variaţia în timp a tensiunii sursei u_s, tensiunii arcului u_a şi curentului din arc i.

corespunzător raportului

$$\frac{U_a}{U_{s\,max}} \leqslant 0{,}54. \qquad (3.261)$$

La cuptoarele electrice cu arc, stabilitatea există şi în cazul în care relaţia (3.261) nu este satisfăcută, deoarece electrozii puternic încălziţi au o inerţie termică suficientă pentru a împiedeca deionizarea în timpul pauzelor de curent.

Intersecţia caracteristicii statice a arcului electric cu cea a sursei de alimentare (înglobînd bobina L) — figura 2.23 dă punctul stabil de funcţionare a circuitului; bobina de reactanţă va avea deci şi rolul de limitare a curentului prin arc.

Arcul electric trifazat, spre deosebire de cel monofazat, prezintă avantajul încărcării simetrice a reţelei de alimentare. În sistemele trifazate cu conductor neutru, comportarea arcului trifazat este identică cu cea a arcului monofazat. În sistemele trifazate fără conductor neutru, reaprinderea arcului stins al uneia dintre faze se produce mai rapid decît în cazul arcului monofazat, datorită creşterii tensiunii pe faza stinsă (întreruptă). Stingerea se va face mai tîrziu, deci stabilitatea arcului este îmbunătăţită.

3.5.2. Cuptoare electrice cu arc, cu acţiune directă

Elementele constructive principale ale acestor cuptoare sînt (fig. 3.94): cuva de topire, electrozii şi portelectrozii, cablurile de alimentare, mecanismele de deplasare a electrozilor şi a bolţii, mecanismul de înclinare a cuptorului.

Cuva de topire se compune din:

— pereţii laterali cu gura de lucru şi de turnare;
— bolta prevăzută cu orificii pentru trecerea electrozilor;
— vatra cu rol esenţial în procesul de topire al oţelului, avînd căptuşeală refractară acidă (SiO_2) sau bazică (MgO);
— carcasa din tablă de oţel.

Izolaţia termică a cuptoarelor cu arc este mult mai slabă decît cea a cuptoarelor cu rezistoare. Aceasta se explică prin aceea că temperatura de lucru din cuptorul cu arc este apropiată de temperatura de înmuiere a materialului refractar, deci solicitările mecanice trebuie să fie suportate de straturile refractare exterioare, mai reci; dacă izolaţia termică ar fi groasă, stratul refractar ar ajunge aproape la aceeaşi temperatură pe toată grosimea, ceea ce ar micşora rezistenţa mecanică a cuvei. Din acest motiv, bolta cuptorului, care este partea cea mai solicitată din punct de vedere termic, nu are izolaţie termică, deşi acesta provoacă pierderi mari de căldură.

Electrozii cuptorului se confecţionează din materiale care au următoarele proprietăţi:

— conductivitatea electrică mare, pentru a avea pierderi prin efect Joule-Lenz reduse;

Scanned with OKEN Scanner

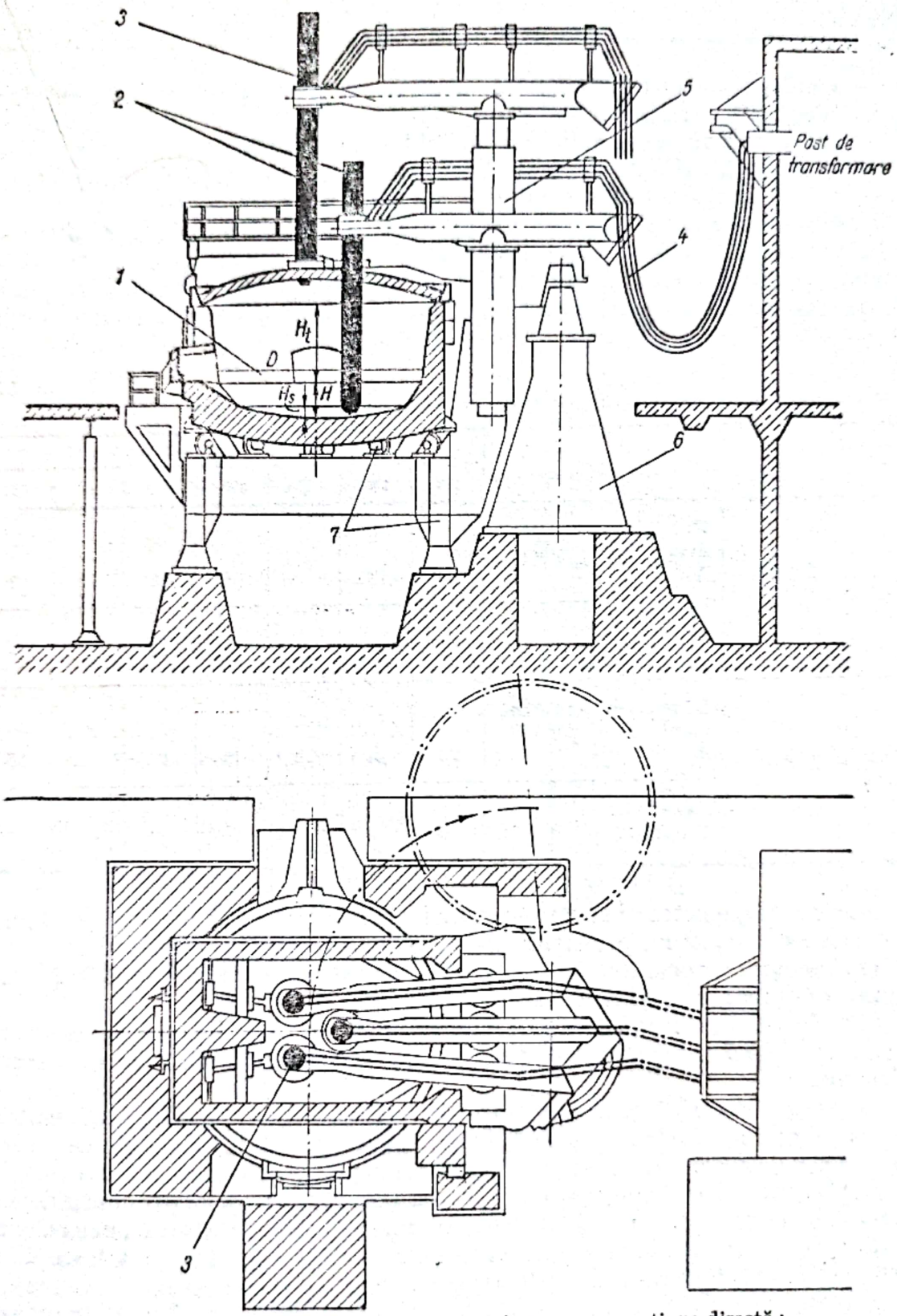


Fig. 3.94. Construcţia cuptorului electric cu arc, cu acţiune directă:
1 — cuva de topire; *2* — electrozii; *3* — portelectrodul; *4* — reţeaua scurtă; *5* — mecanismul de deplasare a electrozilor; *6* — coloana de pivotare; *7* — mecanismul de înclinare a cuptorului.

Scanned with OKEN Scanner

— conductivitate termică mică, pentru a micşora pierderile de căldură prin conducţie termică ;
— temperatură de înmuiere ridicată ;
— rezistenţă faţă de agenţii chimici şi în special faţă de oxigen ;
— să fie prelucrabili mecanic şi să aibă un cost redus.

Materialele care îndeplinesc aceste condiţii sînt cărbunele şi grafitul — tabela 3.26. La construcţiile moderne de cuptoare cu arc, electrozii se confecţionează în exclusivitate din grafit, fiind mai rezistenţi din punct de vedere mecanic şi avînd o rezistivitate mai mică decît a celor din cărbune.

Tabela 3.26

Caracteristicile electrozilor de cărbune şi grafit [54].

		Diametrul electrozilor, mm						
		100	150	250	300	350	400	>400
Electrozi de cărbune	Densitatea de curent maximă admisibilă, A/cm²	—	11	10	9	8	8	7
	Rezistivitatea, Ω mm²/m	—	42	42	42	45	45	45
Electrozi grafitaţi	Densitatea de curent maximă admisibilă, A/cm²	28	24	20	18	17	16	15
	Rezistivitatea, Ω mm²/m	9	9,5	9,5	10	10	10	10

Constructiv, electrozii sînt : — rotunzi, avînd diametrul 100 ... 1 000 mm, lungimea de 1...2 m, prevăzuţi cu cep şi bucşă, pentru prelungire : — tip Söderberg cu autocoacere, sub formă de ţeavă umplută cu pastă de cărbune prelungirea realizîndu-se prin sudare.

Portelectrozii au rolul de a fixa electrozii într-o anumită poziţie printr-un sistem cu pană, resort sau cleşte şi de a realiza alimentarea lor cu energie electrică.

Legătura electrică între portelectrozi şi transformatorul de alimentare se realizează prin reţeaua scurtă, care constă din cabluri flexibile de cupru, de lungime suficientă pentru a permite deplasarea electrozilor.

Deplasarea electrozilor cu o viteză de 0,4...1,2 m/s (dependentă de sistemul de reglare automată utilizat) se realizează cu ajutorul unei coloane fixate de portelectrod, coloană care culisează într-un ghidaj telescopic şi este acţionată hidraulic sau electromecanic.

Pentru încărcarea cuptorului este necesară ridicarea bolţii împreună cu electrozii şi rotirea acestora faţă de cuvă ; această operaţie este efectuată de către o coloană de pivotare prevăzută cu acţionare hidraulică.

Scanned with OKEN Scanner

Mecanismul de înclinare a cuptorului, realizat cu role sau cremalieră, este prevăzut cu acţionare hidraulică sau electromecanică şi permite înclinarea cuptorului în două sensuri, pentru evacuarea zgurei şi a metalului topit.

3.5.3. Echipamentul electric al cuptoarelor cu arc

Elementele principale ale circuitului de alimentare (fig. 3.95) sînt:
— aparatele de conectare de înaltă tensiune (separator, întreruptor);
— bobina de reactanţă pentru stabilizarea arcului electric şi limitarea curenţilor de scurtcircuit;
— transformatorul cuptorului prevăzut cu un sistem de reglare sub sarcină a tensiunii secundare (prize de tensiune în primar, comutator $Y - \Delta$ a conexiunii înfăşurărilor primare);
— reţeaua scurtă;
— aparatele de măsură, protecţie împotriva scurtcircuitelor în reţeaua de înaltă tensiune şi a scurtcircuitelor interne la transformator;
— sistemul de reglare automată (SRA) a funcţionării cuptorului.

Puterea dezvoltată în arcul electric variază în timpul procesului de elaborare a şarjei de oţel; astfel, în timpul afinării puterea scade cu 50% faţă de puterea necesară în timpul topirii. Prin urmare, tensiunea transformatorului trebuie să fie reglabilă.

Bobina de reactanţă se construieşte cu miez feromagnetic şi întrefier pentru ca inductivitatea ei să se menţină constantă în decursul variaţiilor mari ale curentului absorbit de cuptor. În perioada de afinare a oţelului, arderea arcului este stabilă şi bobina de reactanţă poate fi scurtcircuitată. La cuptoarele de mare capacitate reactanţa reţelei scurte este suficient de mare, astfel că în acest caz bobina poate lipsi.

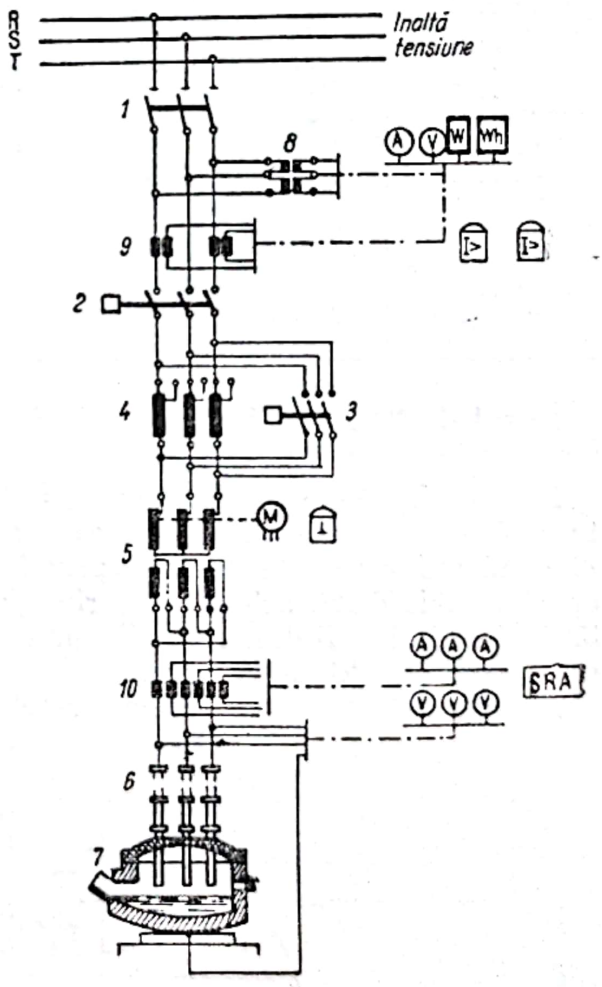


Fig. 3.95. Schema electrică de alimentare a cuptorului electric cu arc:
1 — separator; *2, 3* — întreruptoare; *4* — bobina de reactanţă; *5* — transformatorul cuptorului; *6* — reţeaua scurtă; *7* — cuptorul electric cu arc; *8* — transformatoare de tensiune; *9, 10* — transformatoare de curent.

Tabela 3.27

Date orientative referitoare la cuptoarele electrice cu arc [prospect firma BBC—R.F.G.].

Capacitatea t	Puterea transformatorului kVA	Diametrul electrodului, mm		Tensiunea secundară de linie, V	Puterea bobinei de reactanță, kVA
		Grafit	Cărbune		
1...1,5	900	100	150	150... 65	400
1,5... 2	1200	150	150	150... 65	400
2... 3	1500	150	180	165... 70	500
3... 4	1800	150	200	180... 75	600
4... 5	2200	180	230	190... 80	750
5... 6	2700	180	230	205... 85	850
6... 8	3200	200	250	220... 90	950
8... 10	4000	230	300	235... 95	1100
10... 12	4500	250	300	250... 100	1300
12... 15	5500	300	350	265... 105	1450
15... 20	6500	300	400	285... 110	1700
20... 25	8000	350	450	310... 115	2000
25... 30	10000	400	500	330... 120	2250
35... 40	13000	400	550	365... 130	2500
40... 50	15000	450	600	380... 140	2600
50... 60	18000	500	650	410...1500	2800
60... 80	25000	550	750	440... 160	300...400
80...100	30000	600	850	480... 180	300...400
100...150	36000	700	950	530... 200	350...500
150...200	50000	700	1000	600... 250	400...600

În tabela 3.27 sînt indicate principalele caracteristici ale echipamentului cuptoarelor cu arc.

Pentru obținerea unui factor de putere satisfăcător este necesar ca reactanța conductoarelor care formează rețeaua scurtă să fie cît mai redusă. Această reducere este posibilă prin legarea înfășurărilor transformatorului cu electrozii după schema în triunghi nesimetric (sau bifilară) — figura 3.96, folosind linii duble de alimentare ; schema este utilizată la cuptoarele de capacitate 20...100 tone.

Impedanțele celor trei faze ale rețelei scurte sînt diferite, ceea ce determină încărcarea nesimetrică a lor ; faza slab încărcată se numește „moartă" iar cea puternic încărcată — „tare". Consecințele negative ale acestei nesimetrii — reducerea productivității cuptorului și distrugerea mai rapidă a căptușelii — pot fi combătute prin reglarea independentă a tensiunii și curentului fiecărei faze a rețelei scurte. La cuptoarele de mare putere se utilizează în acest scop trei transformatoare monofazate.

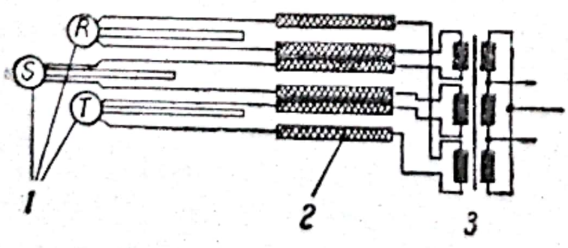


Fig. 3.96. Rețeaua scurtă în conexiunea triunghi nesimetric.
1 — electrozi ; *2* — rețeaua scurtă ; *3* — transformatorul cuptorului.

Scanned with OKEN Scanner

3.5.4. Caracteristicile de funcţionare ale cuptoarelor electrice cu arc

Regimul electric de funcţionare a cuptorului cu arc este caracterizat de tensiunea secundară a transformatorului cuptorului, curentul în arc, reactanţa şi rezistenţa circuitului cuptorului.

Neglijînd curentul de magnetizare al transformatorului în raport cu curentul de sarcină, în schema electrică echivalentă a unei faze a circuitului cuptorului (fig. 3.97, *a*), rezistenţa

$$r = R_B + R_T + R'_L \tag{3.262}$$

şi reactanţa

$$x = X_B + X_T + X'_L \tag{3.263}$$

reprezintă suma parametrilor bobinei B, ai transformatorului T şi ai reţelei scurte L (raportată la primar), iar U — tensiunea de fază a reţelei de alimentare. Rezistenţa variabilă între zero şi infinit a arcului electric a fost notată cu R şi exprimă comportarea arcului electric în diferite regimuri de funcţionare: la scurtcircuitul electrozilor cu şarja va avea valoarea zero, iar la stingerea arcului electric — valoarea infinită.

Reprezentarea arcului electric printr-o rezistenţă variabilă presupune variaţia sinusoidală în timp a tensiunii şi curentului arcului. Deşi arcul electric este o rezistenţă neliniară, această ipoteză nu modifică în mod esenţial concluziile care rezultă din studiul calitativ şi cantitativ al problemei.

Parametrii transformatorului sînt indicaţi în fişa tehnică a acestuia. Parametrii reţelei scurte se determină pe baza unui calcul care trebuie să ţină cont de majorarea rezistenţei în curent alternativ datorită efectului

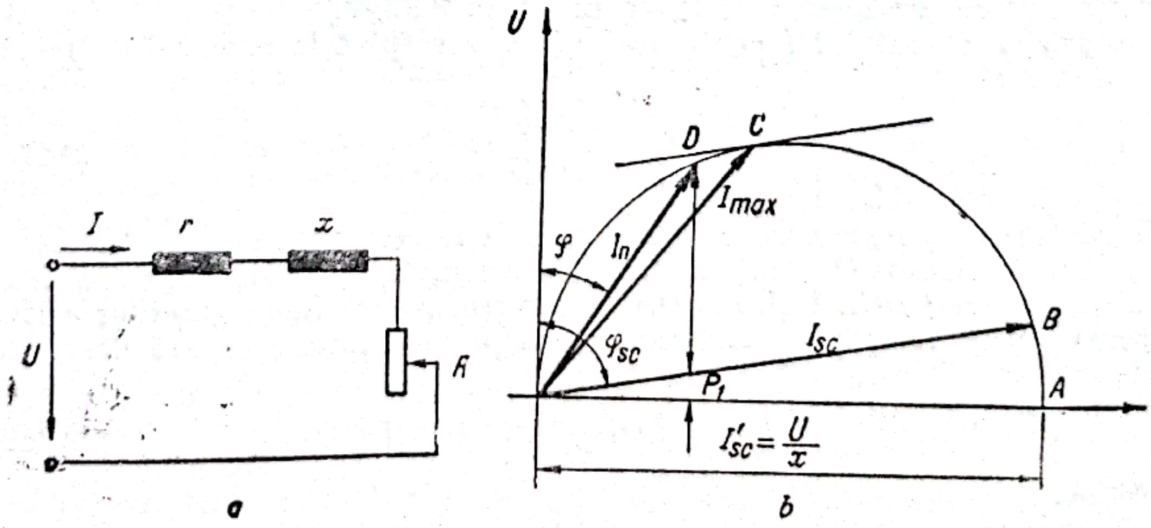


Fig. 3.97. Schema electrică echivalentă *a* şi diagrama circulară *b* a cuptorului electric cu arc.

pelicular şi de proximitate (vecinătate), în conductoarele masive (legate în paralel) ales aceleiaşi faze, de inductivităţile proprii şi mutuale dintre faze [48].

Deoarece rezistenţa circuitului cuptorului este mică, faţă de reactanţă, curentul de scurtcircuit ideal este

$$I'_{sc} = \frac{U}{x}; \tag{3.264}$$

în scopul asigurării unui regim normal de funcţionare al cuptorului, acest curent de scurtcircuit trebuie limitat faţă de curentul nominal I_n, la valoarea

$$I'_{sc} = kI_n \tag{3.265}$$

în care $k = 2{,}5 \ldots 3{,}5$; creşterea curentului de scurtcircuit peste această valoare produce instabilitatea arcului şi suprasolicitarea electrică a echipamentului cuptorului.

Din relaţiile (3.264) şi (3.265) rezultă valoarea relativă a reactanţei x

$$x_{\%} = \frac{x \cdot I_n}{U} \cdot 100 = \frac{100}{k}, \tag{3.266}$$

care, înlocuită în relaţia (3.263) permite stabilirea reactanţei X_B a bobinei.

Dacă parametrii schemei echivalente sînt constanţi, datorită rezistenţei R variabile a arcului electric, locul geometric al fazorului curentului cuptorului

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(r + R)^2 + x^2}} \tag{3.267}$$

va fi un cerc cu diametrul I'_{sc} ca în figura 3.97, *b*.

Mărimea curentului I poate varia de la zero pînă la curentul de scurtcircuit real

$$I_{sc} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} \tag{3.268}$$

iar defazajul φ între curent şi tensiune, de la zero pînă la φ_{sc}.

Cînd tensiunea U este constantă, segmentele verticale cuprinse între arcul de cerc $ODCBA$ şi axa OA caracterizează mărimile puterilor active pentru orice valoare a curentului, adică puterea totală pe fază absorbită de cuptor

$$P = UI \cos \varphi = (r + R)I^2 \tag{3.269}$$

sau

$$P = I \sqrt{U^2 - x^2 I^2}, \tag{3.270}$$

Scanned with OKEN Scanner

puterea pierdută în elementele schemei de alimentare

$$P_1 = rI^2 \tag{3.271}$$

şi puterea dezvoltată în arc

$$P_2 = P - P_1 = RI^2, \tag{3.272}$$

sau

$$P_2 = I\sqrt{U^2 - x^2I^2} - rI^2. \tag{2.273}$$

Randamentul electric al cuptorului cu arc este

$$\eta_e = \frac{P_2}{P} = \frac{R}{r+R}, \tag{3.274}$$

iar factorul de putere

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \sqrt{1 - \left(\frac{xI}{U}\right)^2}, \tag{3.275}$$

sau, cu relaţiile (3.264) şi (3.265),

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{k}\right)^2}. \tag{3.276}$$

Valoarea curentului

$$I_{max} = \frac{U}{\sqrt{2}\,x}\sqrt{1 - \frac{r}{\sqrt{r^2+x^2}}}, \tag{3.277}$$

pentru care puterea dezvoltată în arc are valoarea maximă, se obţine egalînd cu zero derivata relaţiei (3.273) în raport cu curentul. În diagrama circulară I_{max} corespunde punctului C ($\cos\varphi = \cos 45° = 0{,}707$), unde tangenta la cerc este paralelă cu dreapta OB.

Cu ajutorul diagramei circulare se pot trasa caracteristicile de funcţionare ale cuptorului (fig. 3.98). Din aceste caracteristici rezultă că valoarea optimă a curentului nominal I_n, din punct de vedere al puterii dezvoltate în arc şi a factorului de putere, nu trebuie să depăşească valoarea I_{max}. Alegînd $k = 2{,}5 \ldots 3{,}5$ rezultă $\cos\varphi = 0{,}75 \ldots 0{,}8$, valoare

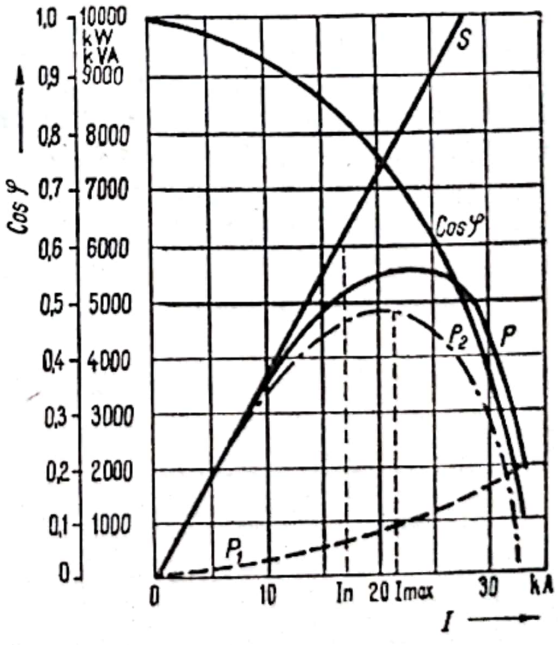


Fig. 3.98. Caracteristicile de funcţionare ale unui cuptor electric avînd puterea aparentă $S = 6$ MVA.

admisibilă şi din punct de vedere al stabilităţii arcului electric (rel. 3.260). Uneori se impune deci îmbunătăţirea factorului de putere cu ajutorul unei baterii de condensatoare derivaţie. Cuptorul cu arc fiind o sursă de armonici superioare ale curentului (în special armonica a treia) bateria de condensatoare poate fi utilizată în cadrul unui filtru electric cu absorbţie (§ 1.6), contribuind la reducerea efectelor negative ale regimului deformant produs de arcul electric.

3.5.5. Calculul cuptoarelor electrice cu arc

Pentru calculul cuptoarelor electrice cu arc se precizează caracteristicile metalului ce urmează a fi topit, capacitatea m (în kg) a cuptorului şi regimul tehnologic necesar: temperatura de topire θ_t, durata topirii t_t — tabela 3.28., durata afinării t_a şi a pauzei t_p necesare reparaţiei căptuşelii şi încărcării cuptorului.

Tabela 3.28

Date orientative asupra valorii timpului de topire a oţelului în cuptoarele electrice cu arc [48].

m, în tone	<5	10...40	80...180
t_t, h	1,25...1,75	1,5...2	2,5...3

Calculul constă în corelarea principalului parametru metalurgic — capacitatea cuptorului, cu parametrul geometric — diametrul cuvei de topire şi cu parametrul energetic — puterea transformatorului, în scopul obţinerii unei productivităţi ridicate la un consum specific de energie cît mai redus.

a. **Dimensionarea cuvei de topire.** Principalele dimensiuni geometrice ale băii sferoconice (fig. 3.94) se determină pe baza unor relaţii empirice rezultate din experienţa de exploatare:

— diametrul oglinzii metalului lichid

$$D = 2000\ C\sqrt[3]{V} \qquad [\text{mm}], \tag{3.278}$$

în care: V este volumul metalului lichid, în m^3;

C — un coeficient, avînd valoarea

$$C = 0{,}875 + 0{,}042 \cdot a \quad \text{pentru} \quad H_s = 0{,}20\ H. \tag{3.279}$$

sau

$$C = 0{,}90 + 0{,}04 \cdot a \quad \text{pentru} \quad H_s = 0{,}25\ H, \tag{3.280}$$

în care: $a = D/H = 4 \cdots 7$, H fiind înălţimea băii de metal, iar H_s — înălţimea porţiunii sferice a cuvei.

Scanned with OKEN Scanner

F — înălţimea spaţiului de topire H_t se calculează cu ajutorul tabelei 3.29, în funcţie de capacitatea şi diametrul cuptorului.

Tabela 3.29

Înălţimea spaţiului de topire la cuptoarele electrice cu arc [48].

m, în tone	H_t
0,5... 5	(0,6 ...0,5)D
5... 40	(0,5 ...0,45)D
40...180	(0,45...0,4) D

Pentru limitarea pierderilor de căldură prin vatră, grosimea căptuşelii refractare şi a izolaţiei termice se ia de obicei egală cu înălţimea H a băii de metal lichid. Grosimea căptuşelii peretelui la nivelul pereţilor înclinaţi se adoptă din considerente constructive între 350 şi 650 mm, în funcţie de puterea cuptorului Grosimea căptuşelii bolţii, fără izolaţie termică, corespunde lungimii cărămizii refractare standardizate.

b. **Calculul termic** al cuptorului se face pentru perioada de încălzire a încărcăturii pînă la temperatura θ_t. Pierderile termice se determină în principiu ca şi la cuptoarele cu rezistoare, cu deosebire că în calculul pierderilor prin pereţii laterali şi prin boltă se introduce 75% din grosimea zidăriei refractare, deoarece zidăria refractară a acestor părţi a cuptorului cu arc se arde aproximativ pe jumătate din cauza căldurii transmise prin radiaţie; dacă nu se ţine seama de acest lucru, pierderile termice calculate vor fi mai mici decît pierderile medii reale.

Consumul de căldură Q al cuptorului (rel. 3.28) este dat de suma cantităţilor de căldură utilă Q_u (rel. 3.4) şi pierdută (rel. 3.29) în timpul topirii (Q_{pt}) şi al pauzei (Q_{pp})

$$Q = Q_u + Q_{pt} + Q_{pp} = Q_u + \Phi_{tpt} \cdot t_t + \Phi_{tpp} \cdot t_p \qquad (3.281)$$

în care $\Phi_{tpp} \simeq 1{,}5\ \Phi_{tpt}$.

c. **Alegerea transformatorului cuptorului.** Din relaţia (3.274) care exprimă randamentul electric al cuptorului

$$\eta_e = \frac{P_2}{P} = \frac{Q/t_t}{S \cos \varphi}$$

rezultă puterea aparentă a transformatorului

$$S = \frac{Q}{t_t \cdot \cos\varphi \cdot \eta_e} \quad [\text{VA}], \qquad (3.282)$$

în care $\eta_e = 0{,}8 \ldots 0{,}9$ şi $\cos\ \varphi = 0{,}85$.

Tensiunea secundară U_t (de linie) a transformatorului se alege conform tabelului 3.27, ţinînd cont de puterea transformatorului, de dimensiunile spaţiului de topire, de caracterul procesului metalurgic şi de calitatea materialelor refractare ale cuptorului. Imbunătăţirea randamentului electric şi a factorului de putere este posibilă, prin majorarea tensiunii; pe de altă parte, la tensiuni ridicate, radiaţia directă a arcurilor lungi prezintă pericolul supraîncălzirii inadmisibile a căptuşelii refractare, ceea ce micşorează rezistenţa pereţilor şi bolţii cuptorului.

Scanned with OKEN Scanner

Curentul de linie nominal al cuptorului

$$I = \frac{S}{U_l \sqrt{3}} \quad [\text{A}]. \tag{3.283}$$

este menţinut constant, puterea modificîndu-se prin variaţia tensiunii.

d. **Diametrul electrodului** d_e se determină pe baza curentului I şi a densităţii admisibile a curentului J_e în secţiunea transversală a electrodului, conform datelor din tabela 3.26.

$$d_e = \sqrt{\frac{4I}{\pi J_e}} \quad [\text{cm}]. \tag{3.284}$$

După alegerea cablurilor care formează reţeaua scurtă şi determinarea parametrilor schemei echivalente a cuptorului (§ 3.5.4), se construiesc caracteristicile de funcţionare ale cuptorului cu arc, care permit stabilirea principalelor mărimi ce caracterizează funcţionarea instalaţiei proiectate.

Exemplu. Să se proiecteze un cuptor electric cu arc pentru topit oţel, avînd următoarele date de proiectare: capacitatea $m = 10$ tone, temperatura de topire $\theta_t = 1\,600\,^{\circ}\text{C}$, durata topirii $t_t = 1{,}5$ ore $= 5\,400$ s (tab. 3.28) şi a pauzei $t_p = 0{,}67$ ore $= 2\,400$ s; densitatea oţelului topit $\rho' = 7{,}2 \cdot 10^3$ kg/m³.

Datele calculului sînt grupate în tabela 3.30.

Tabela 3.30

Exemplu de calcul al unui cuptor electric cu arc

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Volumul metalului lichid	$V = \frac{m}{\rho'}$	$V = \frac{10\,000}{7{,}2 \cdot 10^3}$	1,4 m³
Diametrul oglinzii metalului lichid	(3.279) (3.278)	$a = 4 \ldots 7$ $C = 0{,}875 + 0{,}042 \cdot 5$ $D = 2000 \cdot 1{,}085 \cdot \sqrt[3]{1{,}4}$	5 1,085 2460 mm
Înălţimea băii de metal	$H = \frac{D}{a}$	$H = \frac{2460}{5}$	500 mm
Înălţimea porţiunii sferice a cuvei	(3.279)	$H_s = 0{,}20 \cdot 500$	100 mm
Înălţimea spaţiului de topire	tab. 3.29	$H_t = (0{,}5 \ldots 0{,}45) \cdot 2460$	1200 mm

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.30 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Grosimea căptușelii refractare și a izolației termice		vatră: $\delta_v = H$ perete: $\delta_p = 350...650$ boltă: δ_b = lungimea cărămizii refractare	500 mm 450 mm 230 mm
Energia specifică	fig. 3.2		$i = 0{,}415$ kWh/kg
Căldura utilă	(3.4)	$Q_u = 10000 \cdot 0{,}415 \cdot 3600 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^{10}$ J
Fluxul termic total pierdut în perioada de topire și de pauză	calculat conform § 3.1		$\Phi_{pt} = 500$ kW
	$\Phi_{pp} \simeq 1{,}5\,\Phi_{pt}$	$\Phi_{pp} \simeq 1{,}5 \cdot 500$	750 kW
Consumul de căldură al cuptorului	(3.281)	$Q = 1{,}5 \cdot 10^{10} + 500 \cdot 10^3 \cdot 5400 + 750 \cdot 10^3 \cdot 2400$	$1{,}915 \cdot 10^{10}$ J
Puterea aparentă a transformatorului	(3.282) $\eta_e = 0{,}9$	$S = \frac{1{,}915 \cdot 10^{10}}{5400 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9} \cdot 10^{-3}$	4352 kVA
Alegerea transformatorului	tab. 3.27 [48]	Transformatorul $S_n = 4500$ kVA $x_T = 2{,}54\Omega$; $r_T = 7{,}5 \cdot 10^{-2}\ \Omega$	$U_2 = 250...100$ V $U_1 = 6\,000$ V conexiune Υ/Δ.
Curentul de linie nominal secundar	(3.283)	$I_2 = \frac{4500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 250}$	10 400 A
Curentul de linie primar	$I_1 \simeq I_2 \cdot \frac{U_2}{U_1}$	$I_1 \simeq 10400 \frac{250}{6000}$	440 A
Diametrul electrozilor grafitați	(3.284) tab. 3.26	$d_e = 300$ mm $J_e = \frac{10400}{\frac{\pi \cdot 30^2}{4}} =$ $= 14{,}4$ A/cm² < 18 A/cm²	
Parametrii rețelei scurte	calculați conform [48]		$X_L = 2{,}29 \cdot 10^{-3}\Omega$ $R_L = 1 \cdot 10^{-3}\ \Omega$
Factorul de multiplicitate a curentului de scurtcircuit		$k = 2{,}5...3{,}5$	3
Curentul de scurtcircuit ideal	(3.265)	$I'_{sc} = 3 \cdot 440$	1320 A

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.30 (continuare)

Mărimea	Formula	Calculul	Rezultatul
Parametrii reţelei scurte raportaţi la primar	$X'_L = X_L \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$	$X'_L = 2{,}29 \cdot 10^{-3} \left(\frac{6000}{250}\right)^2$	1,32 Ω
	$R'_L = R_L \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$	$R'_L = 1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{6000}{250}\right)^2$	0,64 Ω
Reactanţa totală necesară	(3.266)	$x_{\%} = \frac{100}{3}$	$x_{\%} = 33\%$
	(2.364)	$x = \frac{6000}{1320}$	$x = 4{,}54$ Ω
Reactanţa bobinei de reactanţă	(3.263)	$X_B = 4{,}54 - 2{,}54 - 1{,}32$	0,68 Ω
Puterea aparentă a bobinei de reactanţă	$S_B = X_B \cdot I_{sc}^2$	$S_B = 0{,}68 \cdot 1320^2$	1200 kVA
Factorul de putere	(3.276)	$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2}$	0,95
Randamentul termic	§ 3.1.3	$\eta_t = \frac{1{,}5 \cdot 10^{10}}{1{,}915 \cdot 10^{10}}$	0,787
Randamentul total	(3.1)	$\eta = 0{,}787 \cdot 0{,}9$	0,71
Consumul specific de energie	(3.8)	$Q_s = \frac{0{,}415}{0{,}71} \cdot 10^3$	584 kWh/t

3.5.6. Efecte electrodinamice la cuptoarele electrice cu arc

Forţele electrodinamice apar la cuptoarele electrice cu arc datorită: interacţiunii dintre cîmpul magnetic al curenţilor din baia de metal topit şi curenţii prin arc, avînd ca efect mărirea suprafeţei de acţiune a arcului electric; — interacţiunii dintre cîmpul magnetic al curentului prin arc şi curenţii din baia de metal topit, avînd ca efect o presiune electrodinamică asupra metalului, orientată de la suprafaţă spre fundul băii.

Mărimea acestor forţe este însă insuficientă pentru a produce amestecarea în profunzime a metalului lichid.

Pentru a îmbunătăţi transmiterea căldurii de la suprafaţa băii spre vatră, se utilizează amestecarea prin inducţie electromagnetică, în perioada după topire, mai ales la cuptoarele a căror capacitate depăşeşte 15 tone.

Scanned with OKEN Scanner

Amestecarea se realizează cu ajutorul agitatorului inductiv, care constă dintr-un stator-arc montat sub vatra cuptorului (fig. 3.99), prevăzut cu o înfăşurare în general bifazată, din ţevi de cupru sau bare de aluminiu, răcite cu apă sau aer. Carcasa cuptorului se execută din oţel nemagnetic, cel puţin în zona agitatorului. Prin alimentarea înfăşurării cu tensiune alternativă, se obţine un cîmp magnetic învîrtitor $\overline{B}$, a cărui interacţiune cu curenţii turbionari I_2 induşi în şarjă produce deplasarea metalului topit. Din punct de vedere fenomenologic, agitatorul inductiv şi şarja pot fi asemănate cu un motor de inducţie cu rotorul masiv.

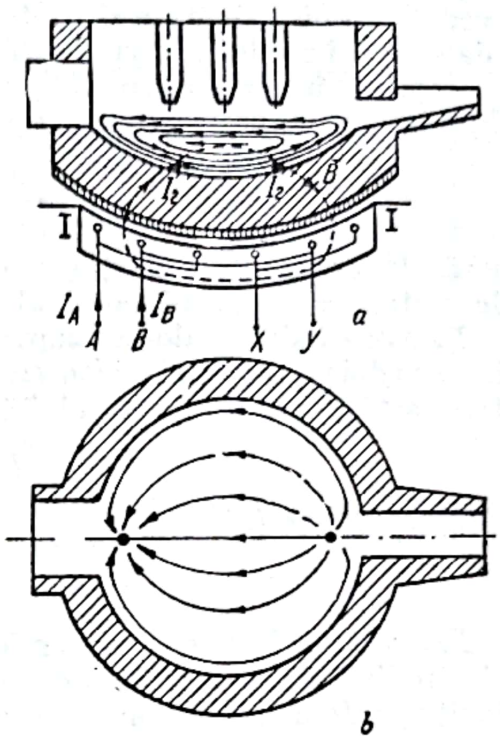


Fig. 3.99. Agitatorul inductiv al cuptoarelor electrice cu arc:

a — deplasarea oţelului în adîncime; *b* — la suprafaţa băii. *AX* — faza întîia a înfăşurării, împărţită în două secţiuni; *BX* — faza a doua a înfăşurării.

Agitarea prin inducţie a băii metalice are următoarele avantaje:

— omogenizarea temperaturii şi compoziţiei chimice a şarjei, reducerea supraîncălzirilor locale;

— accelerarea reacţiilor dintre baia metalică şi zgură, în perioada de afinare;

— accelerarea reacţiilor din perioada de dezoxidare prin difuziune (desulfurare, dezoxidare), perioadă care poate fi scurtată cu circa 30 minute;

— accelerarea topirii adaosurilor de aliere;

— uşurarea îndepărtării zgurei;

— reducerea consumurilor specifice de energie electrică şi de electrozi.

Dezavantajul principal al agitatorului inductiv îl constituie mărirea într-o oarecare măsură a uzurii vetrei. Aceasta implică pe de o parte, limitarea vitezei de mişcare a oţelului la 10...60 cm/s, iar pe de altă parte, controlul permanent al stării vetrei, cu ajutorul unui sistem de semnalizare acustică şi optică, ca în figura 3.73.

În cele ce urmează se vor stabili parametrii principali ai statorului — arc, pornind de la dimensiunile cuptorului cu arc (§. 3.5.5.) şi de la viteza impusă v, de mişcare a oţelului pe vatra cuptorului.

Mărimea *întrefierului* stator-baie este

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \tag{3.285}$$

în care δ_1 este grosimea carcasei nemagnetice şi a căptuşelii vetrei cuptorului; δ_2 — distanţa dintre suprafaţa statorului şi carcasa cuptorului avînd valori între 50 şi 70 mm, ţinînd cont de necesitatea protejării din punct de

vedere termic a înfăşurării statorice şi de asigurarea unei repartiţii sinusoidale a cîmpului magnetic în întrefier.

Întregul întrefier are o mărime de circa 550...1 000 mm, ceea ce conduce la o atenuare puternică a inducţiei magnetice, conform relaţiei [62]

$$B_v = B_s \cdot e^{-\frac{\pi\delta}{\tau}}, \tag{3.286}$$

unde B_v reprezintă inducţia magnetică în vatră; B_s — inducţia magnetică în stator; τ — pasul polar al statorului.

Pentru a reduce valoarea curentului de magnetizare, statorul se construieşte cu doi poli, adică *lungimea statorului* se adoptă din considerente constructive, astfel ca arcul statorului să acopere lungimea fundului băii; practic

$$l_s = (5\cdots6)\,\delta. \tag{3.288}$$

Lăţimea statorului

$$b_s = (0{,}2\ldots0{,}25)l_s. \tag{3.289}$$

Frecvenţa de lucru se alege astfel încît adîncimea de pătrundere δ_F a forţei electrodinamice pe unitatea de volum să fie aproximativ egală cu jumătatea înălţimii H a băii de metal (fig. 3.94)

$$\delta_F = \frac{1}{2} H. \tag{3.290}$$

Deoarece forţa pe unitatea de volum este proporţională cu produsul dintre densitatea curentului J şi inducţia magnetică B din metal (relaţiile 3.77 şi 3.74, în care $\delta = \delta_i$ reprezintă adîncimea de pătrundere a curentului), rezultă

$$\delta_F = \frac{1}{2}\,\delta_i. \tag{3.291}$$

Înlocuind în relaţia (3.291) pe δ_i din relaţia (3.87) (în care $\rho = 136 \cdot 10^{-8}$ Ωm) şi pe δ_F din relaţia (3.290), se obţine valoarea frecvenţei optime de lucru

$$f = \frac{0{,}36}{H^2} \quad [\text{Hz}], \tag{3.292}$$

înălţimea H fiind în metri.

Frecvenţa de lucru a agitatoarelor industriale are valori cuprinse între 0,2 şi 1,5 Hz şi se obţine de la generatoare sincrone rotite lent sau convertoare de frecvenţă cu tiristoare.

Înfăşurarea bifazată a statorului (fig. 3.100) se realizează prin secţionarea bobinajului uneia dintre faze (faza marginală) în două bobine care se aşază la capetele statorului — arc; bobinele fazei nesecţionate (faza mediană) se amplasează la mijlocul circuitului magnetic, acoperind parţial prin suprapunere, bobinele fazei secţionate. Prin conectarea diferită a bobinelor fazelor înfăşurării se pot obţine diferite sensuri ale deplasării meta-

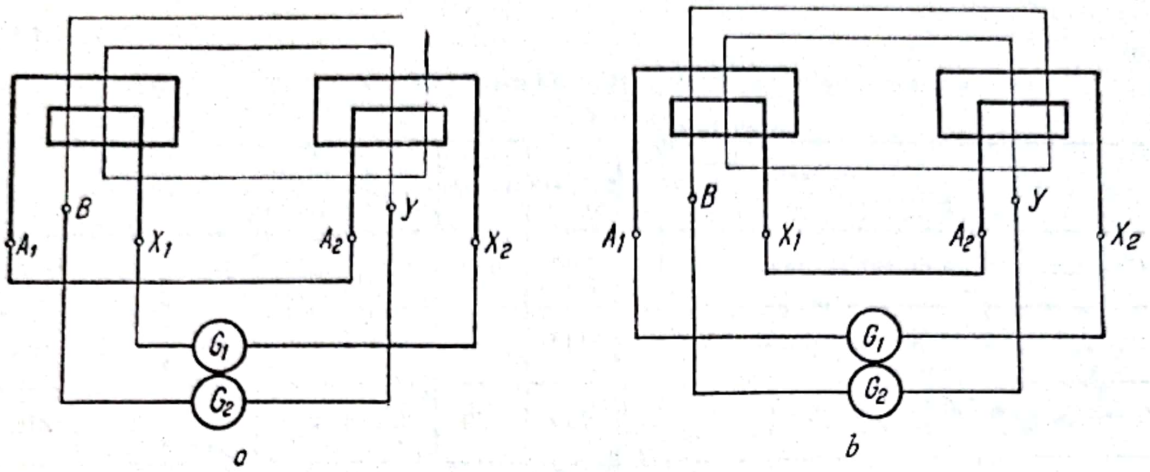


Fig. 3.100. Schemele electrice de alimentare a agitatorului inductiv:
a — amestecarea oţelului; *b* — evacuarea zgurei; A_1X_1, A_2X_2 — secţiunile fazei marginale; *BY* — faza mediană; G_1,G_2 — sursele de tensiune bifazată.

lului lichid, în planuri orizontale sau verticale; ceea ce permite amestecarea oţelului şi evacuarea zgurei.

Alunecarea relativă

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} = \frac{2\tau f - V}{2\tau f} \tag{3.293}$$

are valori cuprinse între 50 şi 90%, pentru ca puterea necesară deplasării metalului lichid (puterea hidraulică sau mecanică) să aibă valoarea necesară

$$P_m = \frac{1-s}{s} P_2; \tag{3.294}$$

puterea electromagnetică este

$$P_{em} = \frac{1}{s} P_2. \tag{3.295}$$

În aceste relaţii P_2 este puterea transformată în căldură în metal, stabilită pe baza pătrunderii undei electromagnetice în conductoare masive aflate în mişcare, iar v_s — viteza cîmpului statoric.

Puterea activă consumată pentru agitarea oţelului lichid este mică, circa 10 ... 40 kW la cuptoarele de capacitate 10 ... 180 tone, deoarece oţelul are vîscozitate redusă, iar viteza şi acceleraţia sînt infime. Datorită valorii mari a curentului de magnetizare factorul de putere este scăzut (0,1...0,5) şi puterea aparentă atinge valori de 100 ... 800 kVA (tab. 3.31).

Ţinînd cont de pierderile în înfăşurările agitatorului (30...200 kW), rezultă randamente de ordinul a 20...30%.

Tabela 3.31

Caracteristicile agitatoarelor inductive fabricate de firma ASEA — Suedia

Diametrul băii cuptorului, cm	320...410	410...450	450...520	520...560	560...610	610...680	> 680
Grosimea căptuşelii vetrei, mm	600	600	600	650	700	750	800
Puterea aparentă a agitatorului, kVA	330	350	335	320	320	385	500
Tensiunea, V	220	220	220	210	200	240	315
Curentul, A	750	800	800	800	800	800	800

3.5.7. Reglarea automată a cuptoarelor electrice cu arc

În timpul funcţionării cuptorului electric cu arc, pentru ca puterea dezvoltată în arc să aibă valoarea impusă, este necesar ca distanţa dintre electrozi şi încărcătura solidă sau baia de metal topit să fie menţinută constantă. Această distanţă şi deci lungimea arcului este impusă de tensiunea şi curentul prin arc, de temperatura şi gradul de ionizare al spaţiului de topire. Acţiunile care modifică lungimea arcului sînt: — schimbarea condiţiilor de temperatură din cuptor prin creşterea temperaturii şarjei; — surparea încărcăturii care conduce la scurtcircuite şi la ruperea arcului; — deplasarea arcului sub acţiunea forţelor electrodinamice; — scurtarea electrozilor.

În scopul menţinerii constante a lungimii arcului, la cuptoarele electrice cu arc se utilizează sistemul de reglare automată a poziţiei electrozilor în funcţie de impedanţa arcului electric. La apariţia unei acţiuni perturbatoare, sistemul de reglare automată trebuie să modifice rapid (1,5...3 secunde) poziţia electrozilor; din acest motiv constantele de timp ale elementelor sistemului trebuie să fie cît mai reduse.

După modul de acţionare al electrozilor sistemele de reglare automată sînt: electromecanice sau electrohidraulice — acestea din urmă prezentînd performanţe superioare. În ambele sisteme măsurarea impedanţei arcului se realizează prin compararea a două tensiuni: $k_1 U_a$ — proporţională cu tensiunea arcului, măsurată cu un transformator de tensiune sau direct la bornele arcului şi $k_2 I_a$ — proporţională cu curentul prin arc, măsurat cu un transformator de curent.

Elementul de comparaţie este reprezentat de: înfăşurarea de comandă a unei amplidine (fig. 3.101, *a*), înfăşurările de comandă ale unor amplificatoare magnetice (fig. 3.101, *b*), înfăşurările statorice ale unui motor bifazat (fig. 3.101, *c*) sau bobina electromagnetului plonjor (fig. 3.101, *d*).

Scanned with OKEN Scanner

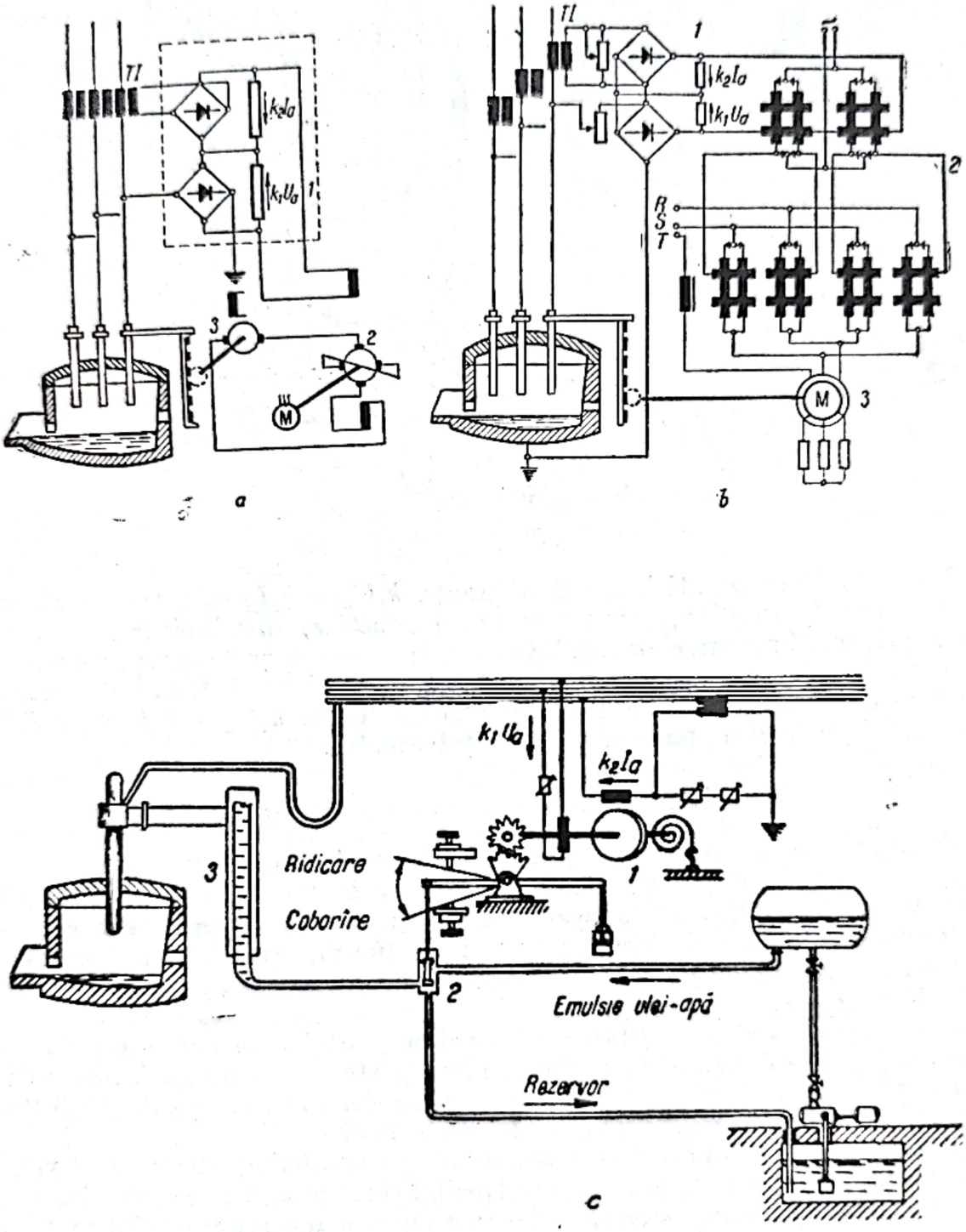


Fig. 3.101. Sistemul de reglare automată a poziției electrozilor:
a — cu amplidină; *b* — cu amplificatoare magnetice; *c* — electrohidraulic cu motor bifazat;
TI — transformator de intensitate; *1* — element de comparație; *2* — regulator; *3* — element de execuție.

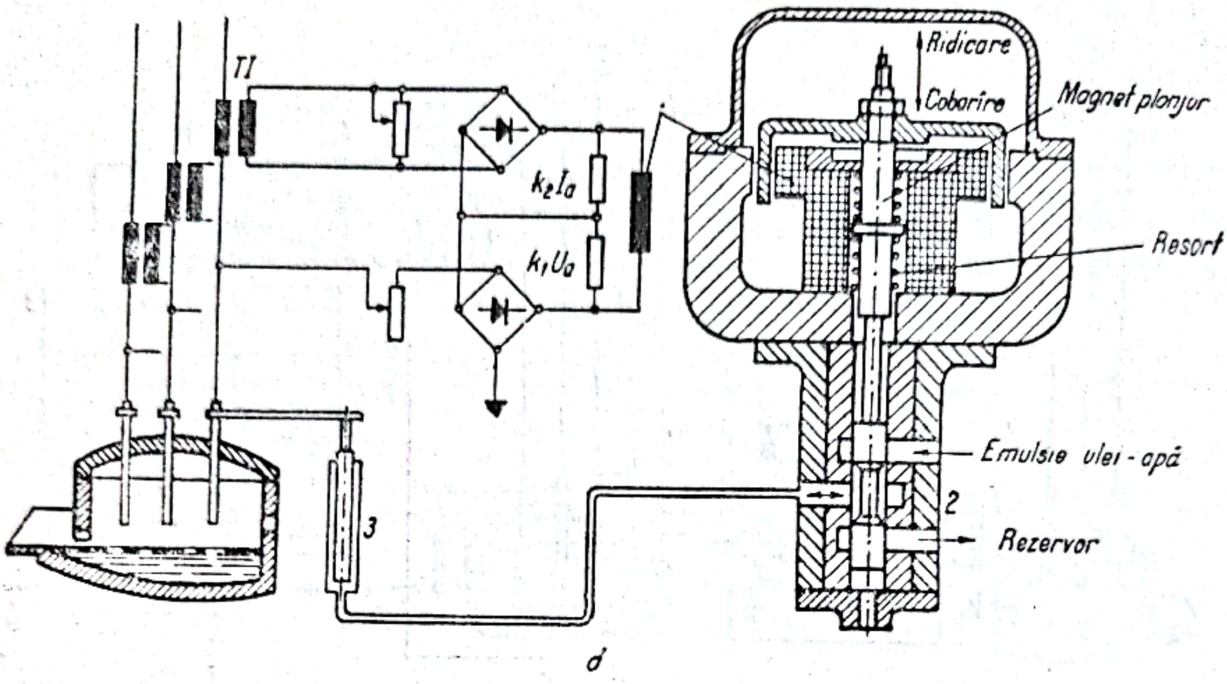


Fig. 3.101.
d — electrohidraulic cu electromagnet plonjor.

Rezultatul comparaţiei, adică diferenţa $k_1U_a - k_2I_a$ este transmisă regulatorului (amplidină, amplificatoare magnetice, distribuitor hidraulic), care acţionează asupra elementului de execuţie — motor de curent continuu, motor asincron trifazat sau coloană cu acţionare hidraulică, care determină deplasarea electrozilor în sensul anulării diferenţei $k_1U_a - k_2I_a$ şi deci a restabilirii valorii impuse a impedanţei arcului.

3.5.6. Cuptoare electrice cu arc şi rezistenţă

Cuptoarele electrice cu arc şi rezistenţă se clasifică în:

1. Cuptoare pentru reducerea minereurilor la temperatură ridicată, în prezenţa carbonului, cantitatea de căldură necesară procesului termochimic producîndu-se în arcul electric; materialul (fontă, feroaliaj, etc.) se colectează în stare lichidă pe vatra cuptorului şi se evacuează periodic prin gurile de scurgere.

2. Cuptoare pentru grafitarea electrozilor şi obţinerea carborundului, în care căldura se dezvoltă în cea mai mare parte în rezistenţa încărcăturii.

Din punct de vedere constructiv aceste cuptoare sînt descoperite (fig.3.102) sau acoperite, în cazul degajării de gaze nocive.

Baia *1* a cuptorului are formă cilindrică sau paralelipipedică, avînd vatra din carbon şi pereţii din şamotă, electrozii *2* sînt aproape în exclusivitate de tip Söderberg cu autocoacere, încărcarea cu minereu a cuptorului se realizează continuu din silozurile *3*, iar gazele sînt captate prin sistemul de absorbţie *4*. Alimentarea cuptorului se face de la transformatoare mono — sau trifazate *5*, prin intermediul reţelei scurte *6*, conectată după schema triunghi

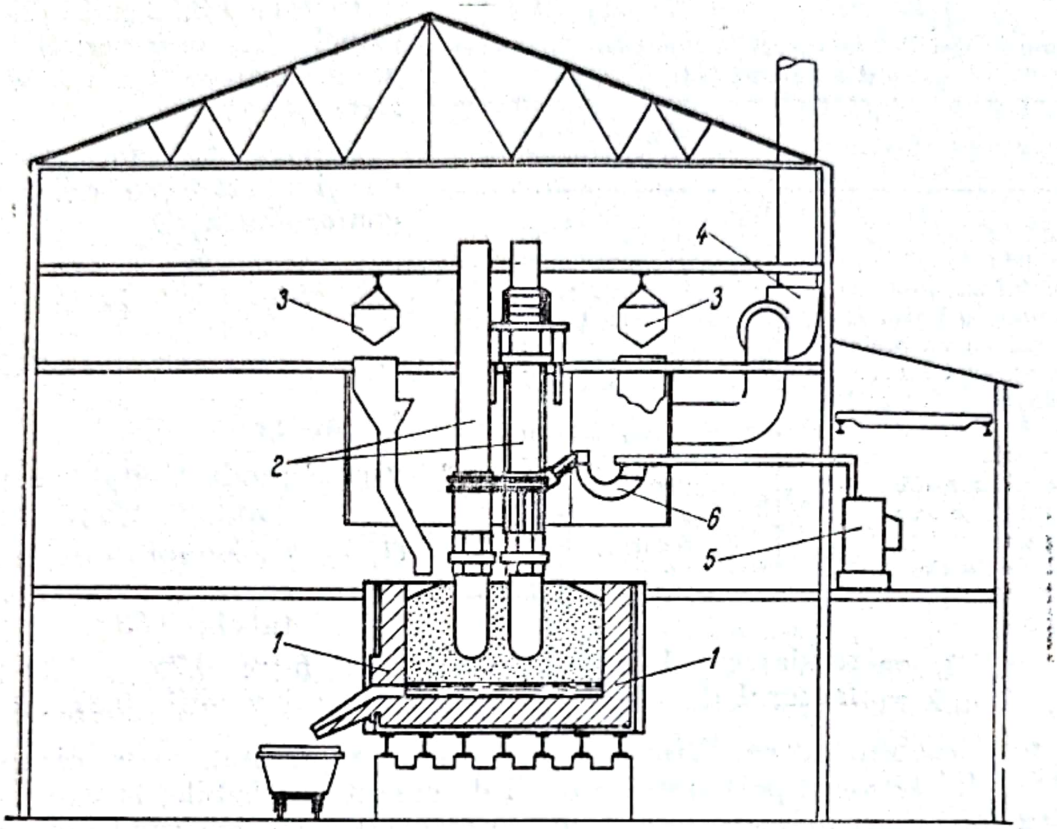


Fig. 3.102. Cuptor electric cu arc şi rezistenţă, de tip descoperit.

nesimetric şi avînd o lungime mult mai redusă decît în cazul cuptoarelor cu arc pentru topit oţel, deoarece cuptoarele electrice pentru minereuri nu trebuie înclinate.

Datorită regimului liniştit de funcţionare al cuptoarelor cu arc şi rezistenţă, bobinele pentru limitarea curenţilor de scurtcircuit nu sînt necesare.

Rezultă că inductivităţile totale la aceste cuptoare sînt mai mici, iar factorul de putere este mai mare decît la cuptoarele de topit oţel.

Tabela 3.32

Caracteristicile unor cuptoare cu arc şi rezistenţă pentru reducerea minereurilor, de construcţie sovietică

Puterea aparentă kVA	2500	3500	7500	10 500	16 500	33 000
Curent kA	13	13	39	48,5	59	87
Tensiunea secundară a transformatorului, V	89...178	216...309	160...110	180...120	210...132	250...130
Diametrul electrodului, mm	450	450	900	1000	1200	1500
Diametrul băii, mm	2700	2700	5200	5700	6700	8700
Înălţimea băii, mm	1200	1300	2100	2100	2300	3000

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 3.33

Consumul specific de energie al cuptoarelor cu arc şi rezistenţă [3].

Material elaborat	Consum specific de energie kWh/t
Ferosiliciu 75%	8600...11500
Ferosiliciu 45%	4750... 6500
Ferocrom cu mult C	3550... 8300
Ferocrom cu puţin C	8700...12000
Feromangan cu mult C	2900... 5200
Feromangan cu 1...2%C	6300... 9500
Silicomangan (circa 20% Si)	4300... 7000
Silicocalciu	13000...16000
Fontă siderurgică	2500... 2600
Carbură de calciu	3200... 4800
Carborund	8000... 9000
Grafitare de electrozi	7000... 8000

În tabela 3.32 sînt indicate principalele caracteristici ale unor cuptoare cu arc şi rezistenţă.

Puterea transformatorului de alimentare se determină conform relaţiei

$$S = \frac{g \cdot Q_s}{\eta \cos \varphi} \quad [\text{kVA}], \tag{3.296}$$

în care:

g este productivitatea cuptorului, în t/h;

Q_s — consumul specific de energie, în kWh/t — tabela 3.33;

η — randamentul instalaţiei, cuprins între 0,75 şi 0,85;

$\cos \varphi$ — factorul de putere, avînd în general valorile 0,87...0,93.

Spre deosebire de cuptoarele cu arc pentru topit oţel, unde diametru electrodului se alege pe baza densităţii de curent admisibile, la cuptoarele pentru minereuri diametrul electrodului se alege în primul rînd din considerente tehnologice; în unele cazuri, acest diametru determină volumul spaţiului de reacţie din jurul electrodului, care influenţează direct productivitatea cuptorului.

Reglarea automată a poziţiei electrozilor se face în funcţie de curentul cuptorului, utilizîndu-se o schemă de comandă automată cu contactoare şi relee a motorului asincron trifazat de acţionare a portelectrozilor.

3.5.9. Cuptoare electrice cu arc în vid

Cuptoarele electrice cu arc în vid sînt cuptoare cu acţiune directă, care spre deosebire de cuptoarele obişnuite cu arc sau cu inducţie permit elaborarea metalelor greu fuzibile şi active din punct de vedere chimic: zirconiu, titan, molibden, oţeluri de calitate superioară etc.

Creuzetul folosit la aceste cuptoare este din cupru, răcit cu apă, ceea ce exclude reacţia metalului topit cu pereţii creuzetului. Topirea se face în vid, la o presiune de 0,1... 100 torr, ceea ce asigură o degazare profundă a metalului şi protejarea sa contra acţiunii aerului.

Cuptoarele electrice cu arc în vid pot avea electrodul consumabil sau neconsumabil, primele fiind mai răspîndite în industrie.

Cuptorul cu electrod consumabil (fig. 3.103) are electrodul confecţionat din bare, vergele sau brichete ale metalului ce urmează a fi topit. Arcul

Scanned with OKEN Scanner

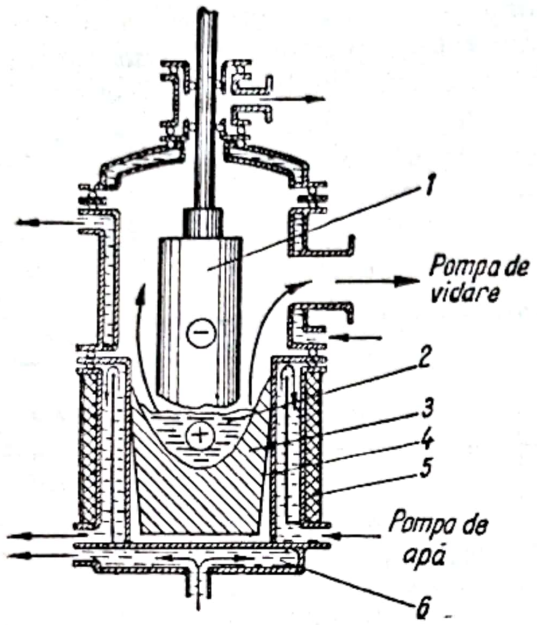


Fig. 3.103. Cuptor cu arc electric în vid, cu electrod consumabil:

1 — electrod consumabil; *2* — faza lichidă a lingoului; *3* — faza solidă a lingoului; *4* — creuzet; *5* — agitator inductiv; *6* — apă de răcire.

electric de curent continuu, care se formează între electrod şi metalul din creuzet, topeşte electrodul, făcînd ca metalul acestuia să curgă sub formă de picături în creuzet. În acest mod se produce o degazare intensă a metalului şi volatilizarea impurităţilor, amplificată de amestecarea fazei lichide cu ajutorul unui agitator inductiv. Cristalizarea metalului are loc în contact cu pereţii răciţi cu apă ai creuzetului. Pentru mărirea zonei de topire, electrodul trebuie să aibă secţiune mare.

Lungimea arcului, de ordinul a 10...20 mm, este menţinută constantă în tot timpul topirii cu ajutorul unui sistem de reglare automată a poziţiei electrodului; caracteristicile tensiune-curent ale arcului din cuptoarele electrice cu vid sînt date în figura 3.104, pentru diferite metale.

Ca surse de alimentare pentru cuptoarele cu arc în vid se utilizează redresoarele cu seleniu sau siliciu, care spre deosebire de generatoarele de curent continuu rotative, simplifică deservirea instalaţiei şi asigură alimentarea ei economică.

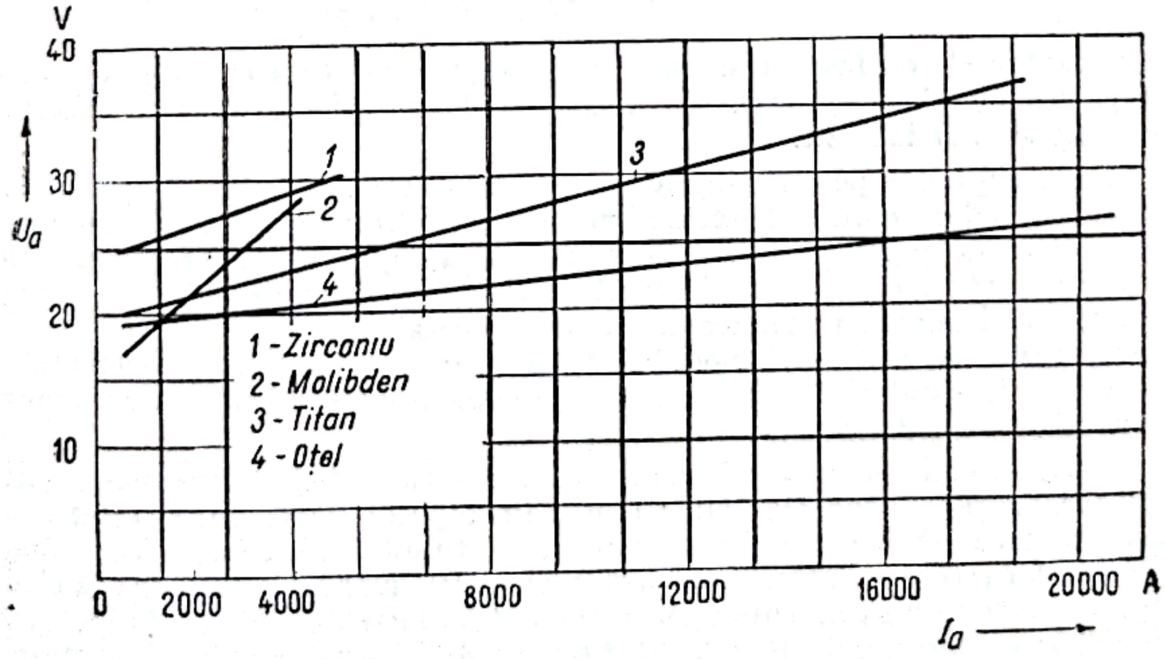


Fig. 3.104. Caracteristica tensiune-curent a arcului în cuptoarele electrice în vid.

Pentru a mări gradul de puritate şi omogenitate a structurii metalului topit, lingoul obţinut după o primă topire este supus la o a doua topire; electrodul pentru a doua topire se confecţionează din lingoul de la prima topire.

În tabela 3.34 sînt indicate datele tehnice ale unor cuptoare electrice cu arc în vid, de construcţie sovietică.

Tabela 3.34

Date tehnice ale unor cuptoare electrice cu arc în vid, de construcţie sovietică

Metalul	Ti	Fe	Zr	Mo	W	Oţel
Diametrul electrodului, mm	152	50,4	56,8	56,8	12,8	152
Diametrul creuzetului, mm	254	127	228	228	38,1	229
Curentul, A	9000	850	4450	6000	1650	10000
Tensiunea, V	30	45	41	65	21	24
Viteza de topire, kg/min	4,10	0,91	4,93	6,85	0,67	—

3.6. CUPTOARE CU FASCICUL DE ELECTRONI. CUPTOARE CU PLASMĂ

În cuptoarele cu fascicul de electroni energia cinetică a electronilor acceleraţi într-un cîmp electric, se transformă în energie termică în metalul ce urmează a fi încălzit.

Aceste cuptoare permit obţinerea metalelor greu fuzibile şi active din punct de vedere chimic (zirconiu, molibden, wolfram etc.) avînd un grad mai ridicat de puritate decît cele rezultate la topirea în cuptorul electric cu arc în vid; încălzirea cu fascicul de electroni se utilizează atît pentru topire, cît şi pentru încălzirea în volum a metalelor.

Din punct de vedere al modului de generare şi focalizare a fasciculului de electroni, instalaţiile pot fi cu catozi inelari (fig. 3.105, *a*) sau cu tunuri electronice (fig. 3.105, *b*).

Electronii emişi de catodul inelar care înconjoară electrodul supus topirii sînt focalizaţi în două fascicule: unul care topeşte electrodul şi altul care menţine faza lichidă a lingoului; în cazul tunului electronic, focalizarea electronilor este realizată cu ajutorul unor lentile magnetice. Pentru ca electronii fasciculului să nu sufere ciocniri cu atomii gazului, instalaţia lucrează în vid, la o presiune de $10^{-3}...10^{-4}$ torr. Solidificarea metalului se obţine la contactul cu creuzetul de cupru răcit cu apă.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a se obţine puteri specifice mari ($10^4 \ldots 10^5$ W/cm^2), se pot utiliza mai multe surse de electroni pentru acelaşi cuptor; tunurile electronice de tip industrial au puteri unitare între 50 şi 250 kW, emiţînd un curent de 2...8 A la o tensiune de 30...40 kV.

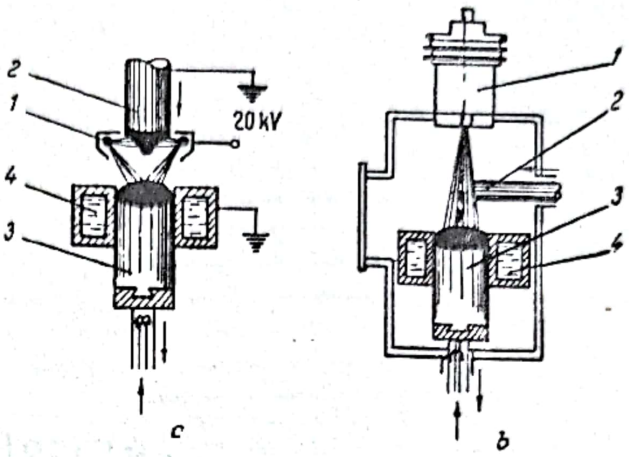


Fig. 3.105. Cuptor de topire cu fascicul de electroni:

a — cu catod inelar; *b* — cu tun electronic. *1* — sursa de electroni; *3* — electrod supus topirii; *3* — lingou din metalul topit; *4* — creuzet de cupru.

În cuptoarele cu plasmă, încălzirea metalului se realizează de către jetul de plasmă produs de un generator de plasmă, prin ionizarea unui gaz de lucru (de exemplu argon), trecut prin spaţiul de descărcare al unui arc electric (§ 4.4). Temperaturile ridicate ce se obţin (zeci de mii de °K) permit obţinerea metalelor şi aliajelor foarte pure, în instalaţii asemănătoare celor cu fascicul de electroni, locul tunului electronic fiind luat de generatorul de plasmă.

Avantajele topirii cu plasmă, faţă de celelalte procedee, constau în:

— posibilitatea utilizării atmosferei dorite în cuptor, într-o gamă largă de presiuni;

— timpul de topire foarte redus;

— posibilităţi largi de reglare a bilanţului termic, a temperaturii băii de metal şi a vitezei de solidificare a metalului.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 4

SUDAREA ELECTRICĂ

4.1. CLASIFICAREA PROCEDEELOR DE SUDARE

În tehnica modernă, sudarea reprezintă o formă perfectă de îmbinare nedemontabilă a metalelor. De la realizarea sudării electrice prin presiune în 1877 (Thomson), aplicării în 1882 (Benardos) a arcului electric între piesă şi un electrod de cărbune şi a descoperirii în 1888 (Slavianov) a arcului electric cu electrod metalic, sudarea a cunoscut o dezvoltare continuă, îmbunătăţindu-se permanent procedeele de lucru şi sursele electrice de alimentare a instalaţiilor de sudare.

Sudarea este operaţia de realizare a unei îmbinări nedemontabile a pieselor metalice, utilizînd încălzirea locală, presiunea sau ambele, cu sau fără folosirea unui metal de adaos similar cu metalul pieselor de îmbinat.

Totalitatea operaţiilor tehnologice folosite la un anumit fel de sudare constituie un procedeu de sudare. Îmbinarea care rezultă prin aplicarea unui procedeu de sudare se numeşte *sudură*. Toate procedeele de sudare pot fi împărţite în două grupuri mari: procedee de sudare prin *topire* şi procedee de sudare prin *presiune* (deformare plastică) — (fig. 4.1).

La sudarea prin topire, marginile pieselor de sudat sînt aduse în stare lichidă prin încălzire locală, cu sau fără adaos de metal; la sudarea prin presiune, îmbinarea se obţine sub acţiunea unei forţe de apăsare transmisă pieselor de sudat, cu sau fără încălzire locală a acestora.

La sudarea cu arc electric, acesta este stabilit între un electrod (vergea, sîrmă sau bandă) şi piesele de sudat. Arcul electric topeşte marginile pieselor din care se formează baia de sudură; învelişul electrozilor, fluxul sau

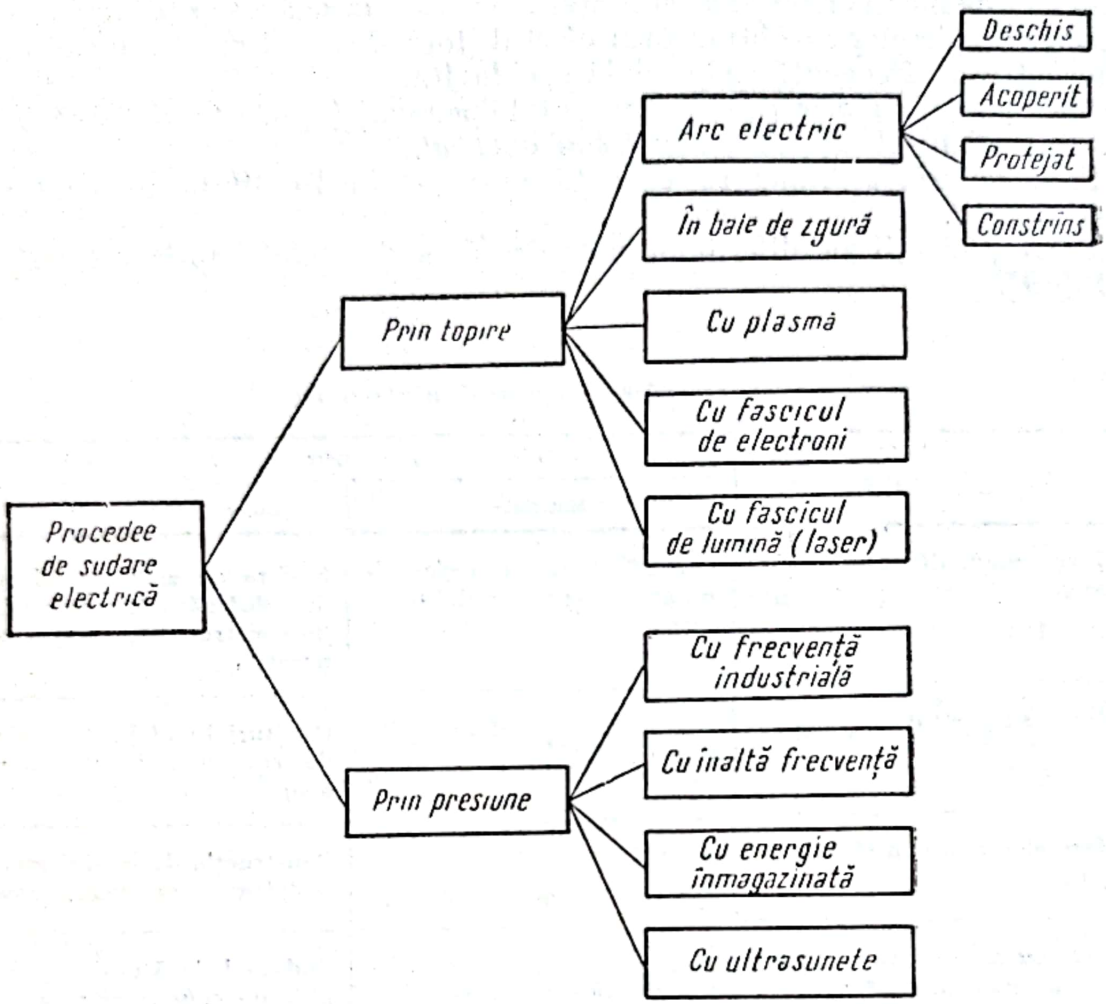


Fig. 4.1. Clasificarea procedeelor de sudare.

mediul gazos protejează spaţiul arcului electric şi uneori participă la formarea băii metalice.

Sudarea în baie de zgură este un procedeu destinat sudării pieselor groase (pînă la un metru); căldura necesară se obţine prin efectul Joule-Lenz al curentului electric ce trece prin baia de flux topit care acoperă metalul depus.

La *sudarea cu plasmă* apare o temperatură foarte înaltă, utilă în cazul sudării metalelor greu fuzibile; plasma se obţine prin strangularea unui arc electric în coloana căruia se introduce un gaz plasmogen (cu grad de ionizare mare) sub presiune.

Sudarea cu fascicul de electroni este un procedeu destinat îmbinării metalelor şi aliajelor greu fuzibile; căldura necesară este cedată de un fascicul de electroni la ciocnirea cu piesele de sudat. Înlocuind fasciculul de electroni cu un fascicul de lumină se obţine *sudarea cu fascicul de lumină* (laser).

Caracteristica *procedeelor de sudare prin presiune* este aplicarea unor forţe exterioare asupra pieselor de sudat, cu scopul de a le aduce într-un contact

suficient de intim pe întreaga suprafaţă în care urmează a se realiza sudarea. Încălzirea pieselor se obţine prin efectul Joule-Lenz al curentului electric alternativ de frecvenţă industrială sau înaltă.

Sudarea prin topire poate fi executată *manual* (cu electrozi de cărbune şi electrozi înveliţi), *semiautomat sau automat.*

Sudarea prin presiune se execută aproape în totalitate *automat* sau *semiautomat.*

Unele aplicaţii ale diferitelor procedee de sudare sînt cuprinse în tabela 4.1 [69].

Tabela 4.1

Unele procedee de sudare şi utilizarea lor

Procedeul de sudare	*Utilizare*	
	Materiale	Domenii de întrebuinţare
Sudare manuală cu arc electric	Oţeluri, fontă cenuşie, limitat pentru metale neferoase	Sudare de acoperire şi sudare de legătură, în domeniile de construcţii şi pentru reparaţii
Sudare sub strat de flux	Oţeluri, metale neferoase (cu flux special)	Cusături lungi în domeniile de construcţii; sudare de acoperire
Sudare electrică sub strat de zgură	Oţeluri	Construcţia de maşini grele, recipiente cu pereţi groşi
Sudare cu arc electric în mediu de gaz protector: — hidrogen, argon, heliu, azot, -bioxid de carbon	Metale uşoare, oţeluri aliate, metale neferoase	Sudare de legătură în domeniile de construcţii; sudare de umplere
	Oţeluri nealiate sau puţin aliate	Sudare automată sau semiautomată, în domeniile de construcţii
Sudarea prin presiune — cap la cap — prin puncte, în linie, prin relief	Oţeluri, metale neferoase	Îmbinarea pieselor de secţiuni mai mari
	Oţeluri, metale uşoare, metale neferoase	Prelucrarea tablelor în domeniile de construcţii

4.2. SUDAREA CU ARC ELECTRIC

La sudarea cu arc electric, topirea metalului de bază (al pieselor) şi a celui de adaos (al electrodului) se realizează cu ajutorul arcului electric; *arcul electric pentru sudare* este ansamblul fenomenelor care au loc între doi elec-

Scanned with OKEN Scanner

trozi care limitează o descărcare electrică stabilă în mediu gazos, la densităţi mari de curent.

Arcul electric pentru sudare face parte din domeniul mai larg al descărcărilor electrice în gaze, nedeosebindu-se principial de acesta (cap. 2.3). Faţă de descărcările luminescente, prezintă o cădere de tensiune catodică mai mică (8...20 V) şi o temperatură mai înaltă a catodului.

După natura mediului în care are loc descărcarea prin arc, deosebim:

— *arc deschis* (vizibil), care arde în aer amestecat cu vapori din materialul de bază şi materialul electrodului, precum şi ai materialului ce formează învelişul electrodului;

— *arc acoperit*, care arde sub un strat de material protector — flux, într-o atmosferă de vapori ai materialului de bază, de adaos şi de protecţie, arcul fiind izolat de influenţa directă a aerului;

— *arc protejat*, care arde într-o atmosferă de gaze de protecţie — argon, heliu, hidrogen, bioxid de carbon, etc. şi vapori ai materialului de bază şi de adaos;

— *arc constrîns* (arc de plasmă), care arde, de asemenea, într-o atmosferă de gaze de protecţie, însă într-un spaţiu de dimensiuni şi formă limitate, pe care-l părăseşte, întins fiind de presiunea gazelor, sub forma unui jet cu temperatura foarte ridicată.

Arcul electric de sudare (consumatorul energiei electrice) şi sursa de alimentare cu curent electric sînt într-o relaţie de interdependenţă. Întrucît caracteristicile statice şi dinamice ale celor patru tipuri de arc au proprietăţi diferite, tot astfel vor fi şi proprietăţile surselor de alimentare.

4.2.1. Arcul electric de sudare

a. **Arcul deschis.** Aprinderea (amorsarea) arcului se realizează astfel: electrodul legat la una din bornele sursei de alimentare (borna negativă în figura 4.2) este adus rapid în contact cu piesa legată la cealaltă bornă a sursei. Curentul mare de scurtcircuit produce o încălzire puternică în neregularităţile de pe suprafeţele în contact (fig. 4.2, *a*), conducînd la topirea lor (fig. 4.2, *b*). Prin îndepărtarea lentă a electrodului, puntea metalică lichidă se întinde şi îşi micşorează secţiunea (fig. 4.2, *c*), ceea ce determină o creştere accentuată a încălzirii acesteia. La atingerea temperaturii de

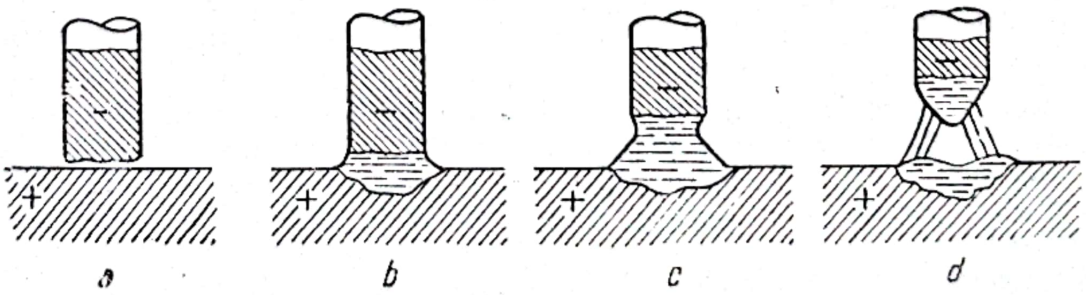


Fig. 4.2. Schema aprinderii arcului electric.

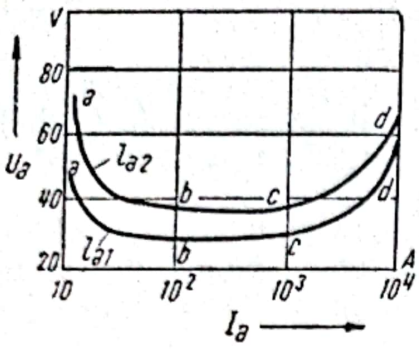


Fig. 4.3. Caracteristica statică a arcului electric.

fierbere a metalului, puntea se rupe şi apare arcul electric în vapori metalici uşor ionizabili (fig. 4.2, *d*).

Stingerea arcului se face prin îndepărtarea electrodului de piesă (alungirea arcului), provocîndu-se astfel o deionizare a spaţiului de descărcare.

Arcul electric de curent continuu. Parametrii principali ai arcului, care determină comportarea acestuia la sudare, sînt: curentul I_a care trece prin arc, tensiunea arcului U_a şi lungimea arcului l_a. Caracteristicile statice ale arcului $U_a = f(I_a)$ pentru diferite lungimi l_a sînt redate în figura 4.3. În cazul variaţiei lungimii arcului ($l_{a_2} > l_{a_1}$), caracteristica se deplasează pe verticală cu mărimea $\Delta U_a \sim \Delta l_a$.

Porţiunea *ab* (caracteristică coborîtoare) corespunde unui curent de sudare pînă la 80...100 A (în condiţii normale de lucru); arderea arcului este instabilă în această zonă [73]. Pentru curenţi între 100...1 000 A, caracteristica arcului (porţiunea *bc*) este rigidă; acesta este domeniul utilizat la sudarea manuală şi sub strat protector de flux. Caracteristica arcului în zona curenţilor mari (peste 1 000 A) este urcătoare (porţiunea *cd*), fiind utilizată la sudarea sub strat protector de flux sau în atmosferă protectoare de bioxid de carbon sau alt gaz.

Arcul electric de curent alternativ prezintă particularitatea fundamentală de a se dezvolta între electrozi ce-şi inversează periodic semnul, rolul de catod şi anod alternînd de la un electrod la altul cu frecvenţa curentului, f; de asemenea, trecerea curentului prin zero cu o frecvenţă de $2f$ pune probleme deosebite de stabilitate a arderii arcului. Arcul electric este stabil cînd arde fără întrerupere un interval de timp îndelungat la o anumită intensitate de curent şi tensiune, fără să se stingă şi fără a trece la altă formă de descărcare. Condiţiile necesare arderii stabile au fost analizate în § 2.2.3 şi § 3.5.1. Pentru a mări stabilitatea arderii arcului se impune reducerea la minimum posibil a valorii tensiunii de reaprindere. Dependenţa acesteia de intensitatea I_a a curentului de sudare este redată în figura 4.4, *a*, iar de frecvenţa f în figura 4.4, *b*.

Stabilitatea arcului electric de curent alternativ depinde şi de lungimea arcului, în sensul că, în condiţii identice, ruperea şi stingerea arcului se produce la o lungime mai mică a arcului decît în cazul curentului continuu.

Pentru arcul de curent alternativ se consideră drept caracteristici statice curbele ce reprezintă variaţia valorilor eficace ale tensiunii şi curentului de sudare; ele au aceeaşi formă cu cele stabilite în curent continuu. Caracteristicile dinamice $u_a = f(i_a)$, ce arată dependenţa între valorile instantanee ale tensiunii şi curentului din arc au o alură similară cu cea redată în figura 3.91, *b*.

Ca urmare a faptului că rezistenţa arcului este neliniară, procesele de sudare sînt considerate ca producătoare de energie deformantă, conţinutul

Scanned with OKEN Scanner

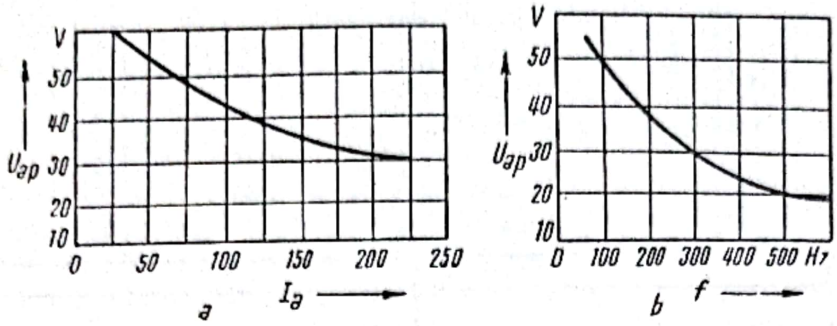


Fig. 4.4. Dependența tensiunii de aprindere U_{ap} a arcului de intensitatea *(a)* și frecvența *(b)* curentului de sudare.

de armonici superioare fiind mai accentuat în curba tensiunii (teoretic, 33% armonica a treia și 20% armonica a cincea) și redus în cea a curentului (2%, respectiv 1%); puterea activă a arcului electric de curent alternativ se reduce cu 5...20% în comparație cu cel de curent continuu, la condiții de lucru similare.

O particularitate a arcului de c.a. o constituie *efectul de redresare* a curentului; datorită însușirilor termofizice diferite ale electrodului și piesei, condițiile de reaprindere a arcului sînt diferite, arcul arde mai mult în semiperioada în care electrodul este catod și emite electroni. Prezența componentei continue reduce calitatea sudurii (micșorează adîncimea de pătrundere, mărește tensiunea arcului etc.) și înrăutățește condițiile de funcționare a utilajului electric (saturează miezurile transformatoarelor și bobinelor de reactanță). Eliminarea componentei continue a curentului este posibilă prin introducerea în serie cu arcul a unui:

— *condensator* metodă utilizată în special la instalațiile de sudare cu electrod nefuzibil;

— *generator* de curent continuu auxiliar sau a unei baterii de acumulatoare, cu tensiunea reglabilă;

— *redresor* șuntat cu un rezistor, ce conduce numai în semiperioada în care piesa de sudat este catod, iar în cealaltă curentul trece prin rezistorul de șuntare.

Arcul de curent continuu prezintă fenomenul de *suflaj magnetic* (fig. 4.5) sub influența forțelor electrodinamice datorate interacțiunii dintre curent și cîmpul magnetic din jurul piesei și electrodului; dacă în jurul arcului se formează cîmpuri magnetice simetrice (fig. 4.5, *a*), arcul arde fără deviere; în caz contrar (fig. 4.5, *b* și *c*) apare fenomenul de suflaj, combătut prin înclinarea corespunzătoare a electrozilor în direcția respingerii arcului. Suflajul magnetic este complet eliminat prin utilizarea curentului alternativ.

Arcul electric trifazat se compune din trei arcuri electrice care ard în același spațiu și sînt alimentate de la o sursă de curent alternativ trifazat. Sudarea cu arc trifazat utilizează de obicei doi electrozi *1* și *2* (fig. 4.6), alimentați de la două faze ale sursei de curent, piesa de sudat *3* fiind conec-

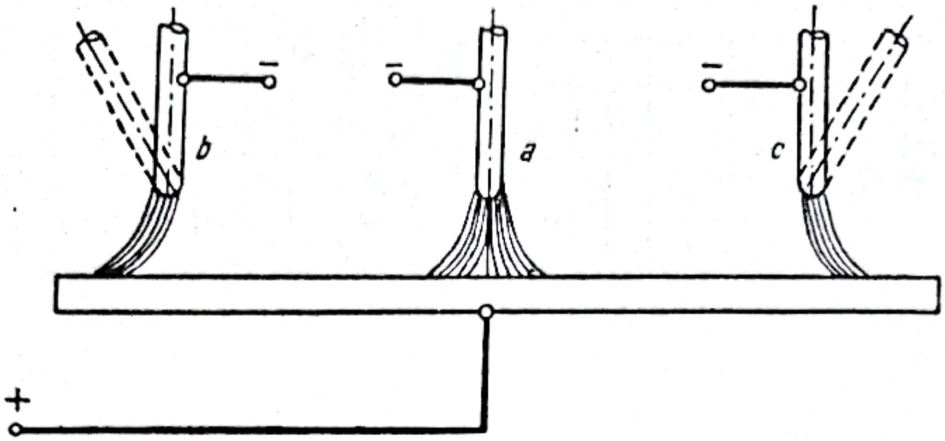


Fig. 4.5. Efectul de suflaj magnetic.

tată la faza a treia ; în cazul sudării manuale se utilizează schema din figura 4.6, *a*, iar în cazul sudării automate cea din figura 4.6, *b*.

Din cele trei arcuri care se formează, două sînt cu acţiune directă asupra piesei, iar al treilea arde între electrozi, fiind independent faţă de piesă ; acest arc este supus unui suflaj spre piesă, forţa de suflare crescînd cu mărirea curentului sau micşorarea unghiului α, ceea ce dă posibilitatea reglării adîncimii de pătrundere a sudării.

Un avantaj deosebit al arcului trifazat constă în posibilitatea reglării puterii lui (a căldurii ce se consumă pentru topirea electrozilor şi a metalului de bază), prin schimbarea raportului dintre curenţii din electrozi şi piesă, şi a tensiunilor sau lungimilor arcului. Există deci posibilitatea alegerii regimului optim de topire a metalului, spre deosebire de sudarea monofazată.

b. **Arcul electric acoperit.** Arcul electric arde într-o zonă închisă, protejată faţă de acţiunile atmosferei printr-un strat de flux care, acoperind baia de sudură, elimină şi posibilitatea stropirii cu metal lichid. Caracteristic sudării sub flux este posibilitatea de ridicare substanţială a mărimii intensităţii curentului şi deci mărirea productivităţii arcului, de zeci de ori faţă de sudarea cu arc descoperit.

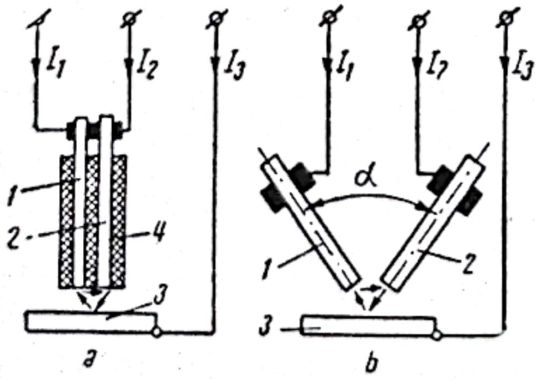


Fig. 4.6. Schema arcului trifazat, cu electrozi dispuşi :
a — în paralel ; *b* — sub un unghi α ; *1*, *2* — electrozi ; *3* — piesă ; *4* — învelişul electrozilor.

În arcul ce arde sub flux au loc aceleaşi procese electrice elementare ca şi în arcul descoperit, cu deosebirea că puterea arcului este foarte mare — densitatea de curent în electrod fiind de 20...200 A/mm².

c. **Arcul electric protejat.** Prezenţa gazului de protecţie în spaţiul arcului permite, pe de o parte, mărirea vitezei de sudare şi a puterii de topire (arderea arcului are loc pe porţiunea crescătoare a caracteristicii sale), iar pe de

altă parte, o îmbunătăţire a calităţilor mecanice ale piesei sudate. Natura gazului poate influenţa procesul metalurgic din spaţiul arcului, din acest punct de vedere gazele putînd fi active (bioxid de carbon, hidrogen sau azot) sau pasive (gaze inerte — argon, heliu).

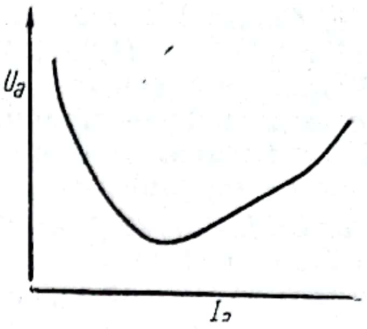


Fig. 4.7. Caracteristica statică a arcului de plasmă.

d. **Arcul constrîns.** Dacă secţiunea coloanei arcului electric este limitată printr-un ajutaj special, densitatea curentului electric creşte concomitent cu tensiunea şi temperatura. Gradul de ionizare tinde spre unitate şi deci, în coloana arcului toţi atomii gazului sînt ionizaţi. Apare astfel plasma, considerată a patra stare de agregare a materiei; ea se comportă ca o rezistenţă ohmică.

Plasma termică, utilizată pentru sudare, tăiere şi acoperire are o serie de caracteristici, dintre care se menţionează:

— dezvoltarea plasmei într-un gaz introdus în spaţiul arcului;

— curgerea cu viteze mari a plasmei ionizate datorită introducerii gazelor sub presiune.

Arcul de plasmă are o caracteristică statică urcătoare (fig. 4.7). Parametrul reglabil este curentul prin arc, tensiunea acestuia (25...180 V) depinzînd de dimensiunile şi forma geometrică a ajutajului, de natura amestecului gazos, de viteza de prelucrare etc.

Pentru alimentarea cu energie electrică a arcului de plasmă se recomandă surse electrice cu caracteristici cît mai căzătoare, întrucît o abatere mare de curent (datorită modificării condiţiilor de lucru) poate conduce la deteriorarea ajutajului — în cazul unei creşteri peste limitele admisibile, sau la stingerea arcului prin deionizare — în cazul micşorării curentului.

Funcţionarea instalaţiilor de sudare cu plasmă este prezentată în § 4.4.

4.2.2. Surse de alimentare a arcului de sudare

Condiţiile pe care trebuie să le îndeplinească sursele de alimentare a arcului se datorează proceselor electrice care apar în arc:

a) Tensiunea de mers în gol a sursei trebuie aleasă pornind de la condiţia stabilităţii arderii arcului, astfel ca $U_0 = (1{,}8...2{,}5)U_a$. Limita inferioară a tensiunii de mers în gol este impusă de tensiunea de aprindere a arcului, iar cea superioară de considerente economice (deoarece atrage scăderea cos φ) şi de tehnica securităţii muncii. La sudarea manuală, tensiunea arcului variind în limite restrînse (20...30 V) pentru curenţii de sudare între 100...500 A, tensiunea de mers în gol trebuie să fie între 55...70 V; la sudarea automată, tensiunea arcului variază în limite mai largi (30...50 V), astfel că $U_0 = 70...90$ V. Pentru sudarea automată sub flux, tensiunea de mers în gol trebuie să fie cu 10 V mai mare decît tensiunea arcului.

Mărirea curentului de lucru impune, la sudarea manuală, micşorarea tensiunii de mers în gol, iar la sudarea automată — mărirea acesteia, întrucît creşte şi tensiunea pe arc.

Scanned with OKEN Scanner

b. Curentul de scurtcircuit din circuitul de sudare trebuie să fie cuprins în limitele $I_{sc} = (1{,}25 \ldots 2)I_a$, în cazul surselor electrice cu caracteristică coborîtoare. Dacă valoarea curentului de scurtcircuit este prea mică se îngreunează aprinderea arcului, iar valori prea mari duc la deteriorarea sursei şi împroşcarea matalului sudurii, fapt ce înrăutăţeşte calitatea sudurii şi scade randamentul instalaţiei.

c. Desfăşurarea procesului de sudare (topirea electrodului şi trecerea picăturilor de metal topit de pe electrod pe piesă) determină o *încărcare dinamică* a sursei de alimentare, adică o variaţie cu mare viteză a curentului de sudare în timp.

Viteza şi forma curbelor de variaţie a curentului şi tensiunii de lucru în cursul proceselor tranzitorii caracterizează proprietăţile dinamice ale surselor de alimentare, legate de inerţia electromagnetică a acestora.

Transformatoarele de sudare au o inerţie electromagnetică redusă, practic inexistentă, în timp ce la generatoarele de curent continuu cu caracteristică exterioară coborîtoare, inerţia este determinată de valoarea inductivităţii mutuale dintre înfăşurările generatorului şi de inductivitatea proprie a înfăşurării de excitaţie.

Sursele existente asigură, în general, viteza de creştere a tensiunii în limitele de $10^6 \ldots 10^7$ V/s.

d) Caracteristica externă a surselor este una dintre cele mai importante proprietăţi ale acestora, de ea depinzînd stabilitatea şi continuitatea arderii arcului electric.

La sudarea manuală cu electrozi fuzibili şi la sudarea automată sub strat de flux, caracteristica arcului fiind rigidă (vezi şi fig. 4.3), caracteristica externă a sursei trebuie să fie coborîtoare (fig. 4.8, curba *1*). În acest fel tensiunea de mers în gol este mai mare decît tensiunea de funcţionare a arcului, iar curentul de scurtcircuit nu depăşeşte mult curentul normal de sudare.

La sudarea semiautomată şi automată în curent continuu cu densităţi mari de curent, caracteristica arcului este urcătoare şi astfel caracteristica externă a sursei trebuie să fie rigidă sau chiar urcătoare (curbele *2* şi *3* din fig. 4.8); datorită faptului că tensiunea de mers în gol are valori scăzute este de dorit obţinerea caracteristicii trasate cu linie întreruptă, pentru domeniul curenţilor mici, soluţie care prezintă însă dificultăţi constructive.

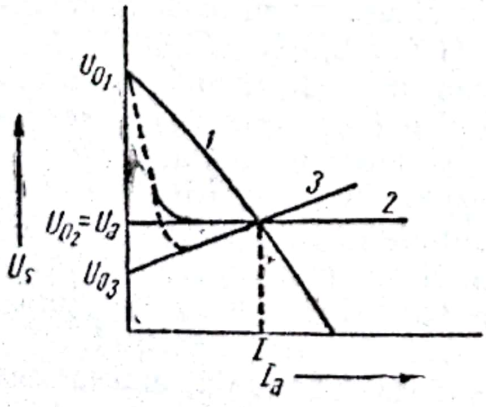


Fig. 4.8. Caracteristicile externe ale surselor de alimentare.

Întrucît caracteristica arcului este cunoscută doar pentru condiţii bine stabilite de lucru, în STAS 2698-61 este dată variaţia tensiunii convenţionale de lucru în funcţie de curent (pentru transformatoare de sudare), arcul electric considerîndu-se ca o rezistenţă pură. Această variaţie este redată în figura 4.9.

Scanned with OKEN Scanner

Sursa trebuie să permită reglarea regimului de sudare (a curentului sau a tensiunii arcului), limitele de reglare fiind prescrise de standarde.

Ecuaţia generală a caracteristicii externe a sursei de alimentare este de forma

$$\underline{U}_s = \underline{U}_0 - \underline{I}_a \underline{Z}_s, \qquad (4.1)$$

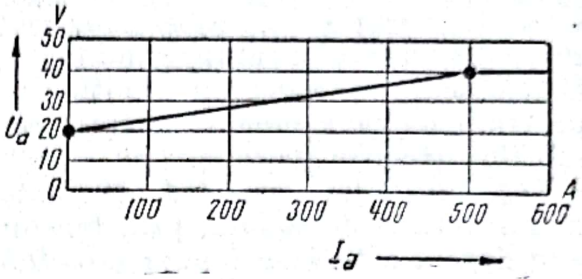


Fig. 4.9. Tensiunea convenţională de lucru în funcţie de curent, pentru transformatoare de sudare.

în care $\underline{U}_s$ este tensiunea la bornele de lucru ale sursei, la un curent de sudare $\underline{I}_a$ dat; $\underline{U}_0$ — tensiunea de mers în gol a sursei; $\underline{Z}_s$ — impedanţa sursei sau a schemei de alimentare a arcului.

Astfel, la funcţionarea stabilă, în regim staţionar ($\underline{U}_s = \underline{U}_a$) se obţine

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_a}{\underline{Z}_s} \text{ la } \underline{U}_a = \underline{U}_s = \text{const.}, \qquad (4.2)$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_0 - \underline{I}_a \underline{Z}_s \text{ la } \underline{I}_a = \text{const.}, \qquad (4.3)$$

pe baza cărora se stabilesc următoarele metode de reglare a regimului de sudare:

— schimbarea tensiunii de mers în gol a sursei, obţinînd o familie de caracteristici externe pentru care, la o tensiune invariabilă a arcului U_a se obţin diferite valori ale curentului I_a (fig. 4.10, *a*);

— schimbarea impedanţei Z_s şi menţinerea constantă a tensiunii de mers în gol U_0 (fig. 4.10, *b*);

— reglarea combinată, prin folosirea ambelor metode (fig. 4.10, *c*), întreaga gamă de reglare fiind divizată în două sau trei trepte, ceea ce permite o reglare lentă şi continuă a regimului de sudare.

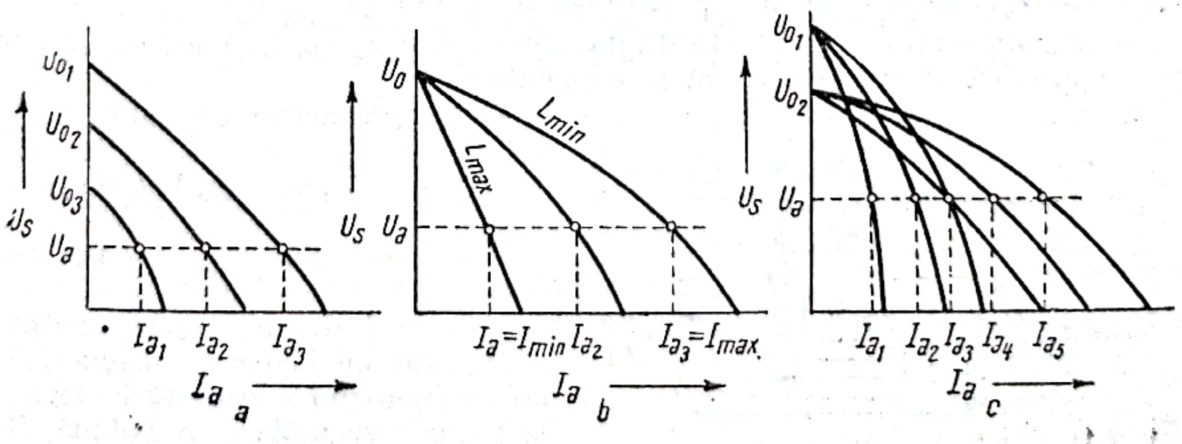


Fig. 4.10. Familia de caracteristici externe ale sursei:

a — la variaţia tensiunii de mers în gol; *b* — la variaţia impedanţei (sursei); *c* — la reglare combinată.

Clasificarea surselor se poate face — după natura curentului electric: surse de curent alternativ şi de curent continuu; — după numărul de posturi de sudare alimentate simultan: surse pentru un singur post şi surse pentru mai multe posturi (multipost) — după procedeul de sudare: surse pentru sudarea manuală cu arc deschis, pentru sudarea automată cu arc sub flux şi surse speciale.

Regimul de lucru fiind determinat de curentul I_a care trece prin arc în cursul duratei de sudare, prin tensiunea de lucru U_a la bornele arcului şi prin durata activă de funcţionare DA, fiecare sursă de alimentare se alege în funcţie de aceşti parametri.

În cele ce urmează se vor studia diferitele tipuri de surse, cu menţionarea principiului de obţinere a caracteristicilor externe corespunzătoare.

4.2.2.1. SURSE DE CURENT ALTERNATIV PENTRU SUDAREA CU ARC ELECTRIC

Cea mai utilizată sursă de curent alternativ este transformatorul de sudare, realizat în multe variante constructive; cu întrebuinţări particulare se utilizează maşinile rotative, şi anume convertizorul asincron trimonofazat şi generatoarele pentru sudare cu frecvenţă mărită.

Caracteristica externă, în general coborîtoare, este obţinută prin mărirea reactanţei de scurtcircuit a sursei de alimentare. În acest fel se obţine un circuit de sudare care are în serie cu arcul electric o inductanţă, ceea ce prezintă o serie de avantaje: asigurarea stabilităţii arderii arcului electric (prin defazarea curentului faţă de tensiune şi reducerea factorului de putere) şi un randament bun al sursei.

Transformatoare de sudare. Mărirea reactanţei de scurtcircuit se practică în secundarul transformatorului, unde tensiunea este mai redusă şi pericolul de electrocutare în cursul manipulării este mai mic. Constructiv se remarcă următoarele soluţii principale:

— transformator cu inductanţă pe miez separat, cu legătură electrică între transformatorul normal şi bobina de reactanţă;

— transformator cu inductanţă pe miez comun, cu legătură electrică şi magnetică între cele două elemente;

— transformator cu şunt magnetic;

— transformator cu bobine mobile.

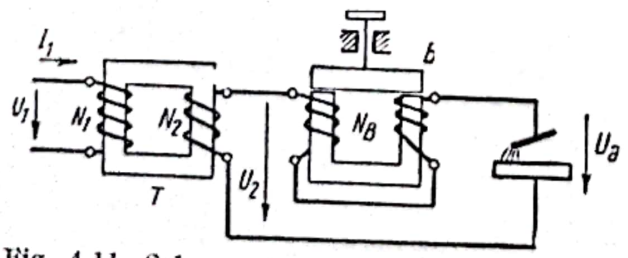


Fig. 4.11. Schema de principiu a transformatorului de sudare cu inductanţă pe miez separat: T — transformator; B — bobină de reactanţă.

Transformatoare de sudare cu inductanţă pe miez separat. Se compun dintr-un transformator monofazat cu dispersie magnetică normală, avînd conectată în serie, la bornele secundare, o bobină B de reactanţă cu inductanţă variabilă (fig. 4.11).

Scanned with OKEN Scanner

Inductanţa bobinei este o inductanţă de dispersie deoarece nu există un cuplaj magnetic între înfăşurările transformatorului şi bobină.

Mersul în gol. Spirele bobinei de reactanţă nu participă la crearea t.e.m. la mersul în gol. De aceea,

$$U_0 = \frac{N_2}{N_1} U_1,$$

raportul de transformare N_2/N_1 alegîndu-se astfel încît să se asigure aprinderea şi arderea stabilă a arcului pentru întregul domeniu de reglaj.

Mersul în sarcină. Circuitul secundar este închis prin arcul electric. Căderea de tensiune în înfăşurările transformatorului fiind mică, tensiunea necesară arderii stabile a arcului se obţine datorită bobinei de reactanţă, impedanţa totală de sarcină fiind

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_2} + jX_B. \tag{4.4}$$

În studiul transformatoarelor de sudare se obişnuieşte a se raporta mărimile caracteristice înfăşurărilor primare la cele secundare, schema echivalentă a transformatorului cu inductanţă pe miez separat fiind redată în figura 4.12.

Din schema echivalentă simplificată a transformatorului se obţine ecuaţia caracteristicii externe

$$\underline{U}_a + \underline{Z}_{sc} \cdot \underline{I}_2 + jX_B\underline{I}_2 = \underline{U}_0, \tag{4.5}$$

de unde (în ipoteza neglijării căderii de tensiune în rezistenţa de scurtcircuit)

$$U_a = \sqrt{U_0^2 - I_2^2(X_1' + X_2 + X_B)^2}. \tag{4.6}$$

În figura 4.10 sînt reprezentate caracteristicile externe ale transformatorului de sudare cu inductanţă pe miez separat.

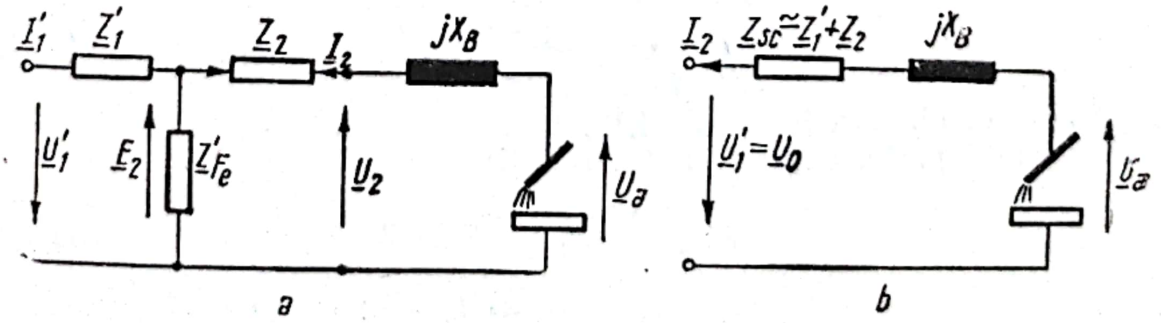


Fig. 4.12. Schema echivalentă *(a)* şi schema echivalentă simplificată *(b)* a transformatorului de sudare cu inductanţă pe miez separat.

Scanned with OKEN Scanner

Mersul în scurtcircuit. La scurtcircuit $U_a = 0$, astfel că din relaţia (4.5) rezultă

$$\underline{I}_{2sc} = \frac{\underline{U}_0}{j(X_1' + X_2) + jX_B}. \tag{4.7}$$

Întrucît $jX_B \gg j(X_1' + X_2)$, tensiunea indusă în înfăşurarea secundară a transformatorului se repartizează în majoritate pe bobina de reactanţă, căreia îi revine astfel rolul de limitare a curentului de scurtcircuit.

Bobina de reactanţă trebuie să aibă o putere reactivă mare, un volum cît mai redus şi să permită reglarea regimului de sudare într-un domeniu cît mai larg.

Puterea reactivă Q_B a bobinei, aproximativ egală cu puterea aparentă S_B, este

$$Q_B = X_B \cdot I^2 \simeq S_B = UI; \tag{4.8}$$

exprimînd tensiunea la bornele bobinei

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_B \Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_B B_\delta A_\delta$$

şi curentul (neglijînd tensiunea magnetică a miezului feromagnetic)

$$I = \frac{1}{\sqrt{2} N_B} \cdot \frac{B_\delta \delta}{\mu_0},$$

în funcţie de numărul de spire N_B, inducţia B_δ în întrefier, lungimea întrefierului δ şi suprafaţa acestuia A_δ, se obţine

$$Q_B \simeq \frac{\omega}{2} \cdot \frac{B_\delta^2 \cdot \delta \cdot A_\delta}{\mu_0}. \tag{4.9}$$

Reactanţa $X_B = \omega L_B$ a bobinei este variabilă, în funcţie de domeniul de reglare a regimului de sudare, inductanţa L_B a bobinei la tensiunea pe arc constantă fiind cuprinsă între limitele

$$L_{min} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_a^2}}{\omega \cdot I_{max}}, \tag{4.10}$$

$$L_{max} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_a^2}}{\omega \cdot I_{min}}, \tag{4.11}$$

după cum se observă în figura 4.10, *b*.

Pe de altă parte, expresia inductivităţii

$$L_B = \frac{N_B^2}{R_m} \simeq \frac{N_B^2}{\frac{\delta}{\mu_0 \cdot A_\delta}} \tag{4.12}$$

permite stabilirea parametrilor constructivi ai bobinei.

Scanned with OKEN Scanner

Întrefierul δ are rolul de a mări puterea reactivă a bobinei în condiţiile unui volum redus de material feromagnetic şi de a permite obţinerea unor caracteristici magnetice liniare ale bobinei.

Reglarea regimului de sudare se obţine prin :

— modificarea prin prize a raportului de transformare N_2/N_1 — figura 4.10, *a*. În acest caz se modifică tensiunea de mers în gol, fapt care trebuie avut în vedere la arderea stabilă a arcului ;

— modificarea reluctanţei magnetice R_m a bobinei prin variaţia numărului de spire N_B (rel. 4.12) sau prin variaţia lungimii întrefierului δ, obţinîndu-se caracteristici asemănătoare celor din figura 4.10, *b*.

Bobinele se construiesc cu posibilităţi de reglare a întrefierului, în diferite soluţii constructive (mecanism cu şurub, acţionat manual sau electromecanic). Pentru curenţi de sudare mici se utilizează bobine cu un singur întrefier, în timp ce pentru curenţi de sudare mari se construiesc două întrefieruri. Spre deosebire de reglarea în trepte, posibilă în cazul anterior, modificarea întrefierului permite obţinerea unui reglaj fin.

— modificarea secţiunii întrefierului A_δ este folosită la transformatorul cu şunt magnetic ;

— modificarea permeabilităţii magnetice μ a miezului bobinei printr-o premagnetizare în curent continuu. Reglajul curentului continuu se poate face prin rezistenţe sau potenţiometric, la transformatoare de putere mică sau prin amplificatoare magnetice — pentru puteri mari de lucru. Comanda prin amplificatoare magnetice dă posibilitatea reglării curenţilor de sudare prin curenţi relativ scăzuţi şi de a menţine constant regimul de funcţionare independent de oscilaţiile tensiunii reţelei.

Transformatorul de sudare comandat prin premagnetizare (fig. 4.13) se compune dintr-un transformator monofazat de construcţie normală şi o bobină de sudare cu trei coloane, premagnetizată în curent continuu. Pe coloanele laterale se găsesc înfăşurările de sarcină şi de premagnetizare, coloana din mijloc fiind prevăzută cu un întrefier, pentru asigurarea unor proprietăţi mai bune de sudare în domeniul curenţilor mici. Pe această

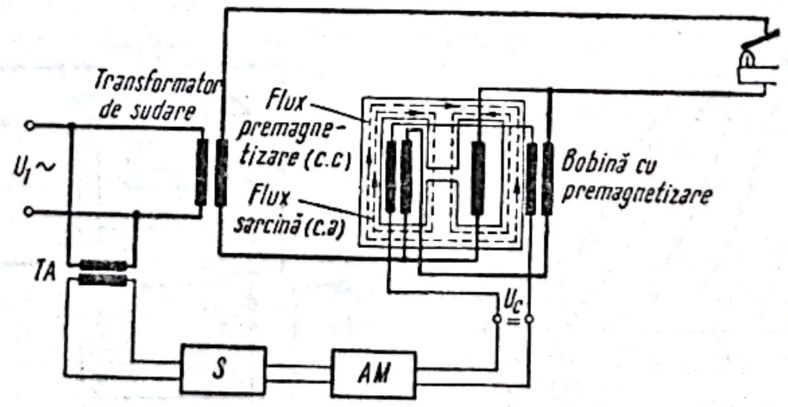


Fig. 4.13. Schema de principiu a transformatorului de sudare comandat prin premagnetizare :

S — stabilizator ; *AM* — amplificator magnetic ; *AT* — transformator auxiliar.

coloană se poate afla, la unele construcţii, o înfăşurare conectată în paralel cu înfăşurările de sarcină, în care se obţine un curent constant, proporţional cu dimensiunile întrefierului.

Sensul de bobinare al celor două înfăşurări este astfel ales încît: — în coloanele laterale şi în juguri, fluxurile de c.c. şi de c.a. să se suprapună, în timp ce în coloana din mijloc să treacă numai fluxul de c.a., în acest mod reducîndu-se amperspirele necesare premagnetizării; — în înfăşurarea de premagnetizare să nu apară componente alternative datorate curentului din înfăşurarea de sarcină.

Caracteristicile statice obţinute sînt pronunţat căzătoare, raportul curenţilor fiind $I_{sc}/I_n = 1{,}05 \ldots 1{,}14$ (fig. 4.14).

Dintre avantajele acestui tip de transformator se menţionează:

— reglarea uşoară şi rapidă, posibilă şi de la distanţă;

— curentul de sudare este practic sinusoidal, cu o trecere rapidă prin zero (asigură condiţii bune de reaprindere);

— caracteristică dinamică foarte bună;

— lipsa pieselor în mişcare şi astfel, lipsa vibraţiilor şi a zgomotului.

Transformatoare de sudare cu inductanţă pe miez comun. Transformatorul şi bobina de reactanţă din circuitul de sudare sînt cuplate electric şi magnetic, cu dispersie magnetică normală, pe un miez magnetic comun fiind aşezate cele trei înfăşurări: primară I, secundară II şi de reacţie III — figura 4.15. Bobina de reactanţă se execută cu întrefier reglabil, înfăşurarea fiind în conexiune directă sau inversă faţă de înfăşurarea secundară; conexiunea inversă măreşte randamentul şi factorul de putere al transformatorului. Prin mărirea întrefierului creşte reluctanţa magnetică a porţiunii respective de miez, astfel că fluxul principal se va închide în majoritate prin miezul transformatorului propriu zis.

Fenomenele electrice sînt identice cu cele de la transformatorul de sudare cu inductanţă pe miez separat. Reglarea regimului de sudare se face prin

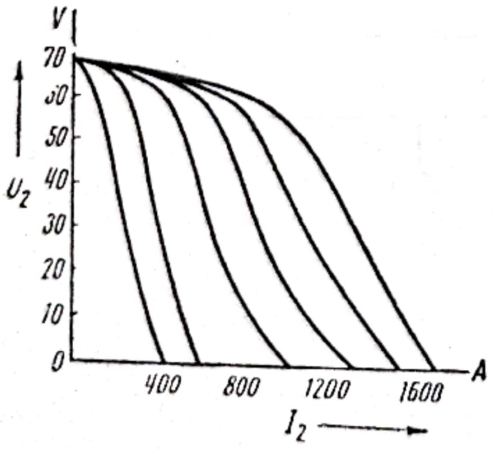


Fig. 4.14. Caracteristicile externe ale transformatorului de sudare comandat prin premagnetizare (S=77 kVA, I_n=270...1 200 A).

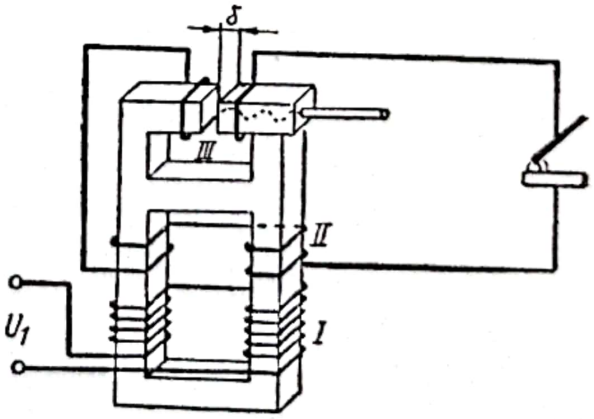


Fig. 4.15. Schema de principiu a transformatorului de sudare cu inductanţă pe miez comun.

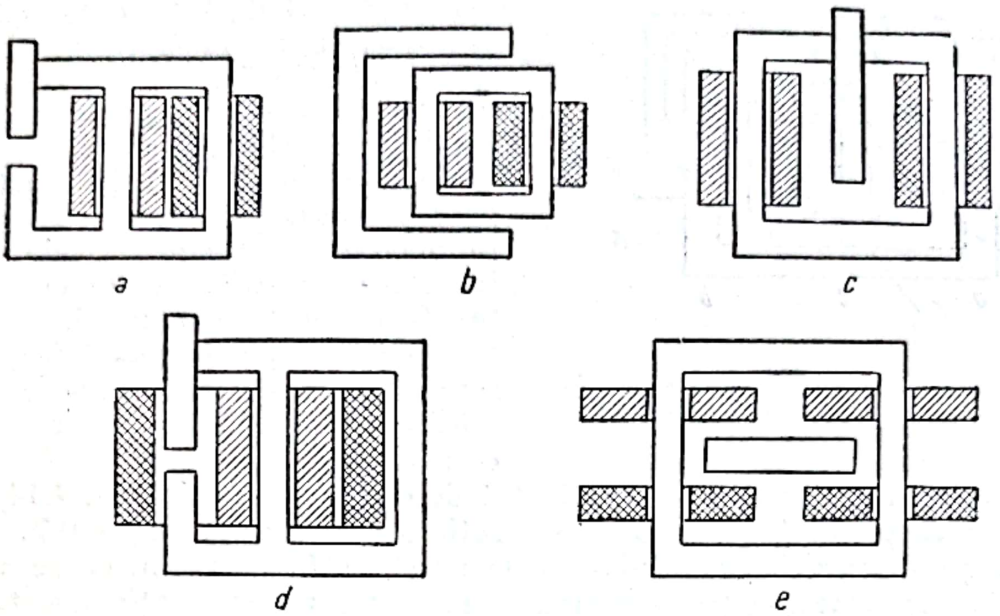


Fig. 4.16. Tipuri constructive ale transformatoarelor de sudare cu şunt magnetic TASM.

modificarea întrefierului (cu creşterea lungimii acestuia, reactanţa bobinei scade).

Aceste tipuri de transformatoare prezintă avantajul unei construcţii monobloc şi, în diferite variante constructive, îşi găsesc o largă aplicaţie în tehnica sudării.

Transformatoare de sudare cu şunt magnetic — au o dispersie magnetică mărită artificial cu şunturi magnetice mobile. Se împart în două grupuri principale:

a — Transformatoare cu dispersie magnetică de jug (fig. 4.16, *a*, *b* şi *c*) caracterizate printr-un flux de dispersie ale cărui linii magnetice se închid între jugurile circuitului feromagnetic, solenaţia unei bobine fiind preponderentă faţă de cealaltă. Înfăşurările sînt aşezate pe coloane diferite (sau pe aceeaşi coloană), reglarea dispersiei magnetice obţinîndu-se cu „şunturi magnetice de jug". Cu cît este mai mare reluctanţa magnetică a circuitului şuntat cu atît inductanţa de dispersie a transformatorului este mai mică şi curentul de sudare va creşte.

b — Transformatoare la care fluxul magnetic de dispersie se închide în majoritate prin spaţiul între înfăşurarea primară şi secundară (fig. 4.16, *d*, *e*).

O variantă modificată a tipului prezentat în figura 4.16, *c* avînd înfăşurarea secundară divizată într-o înfăşurare „principală" şi una „de reacţie", permiţînd modificarea reluctanţei magnetice a şuntului prin variaţia suprafeţei întrefierului, stă la baza unor tipuri constructive des întîlnite în practică, inclusiv în ţara noastră.

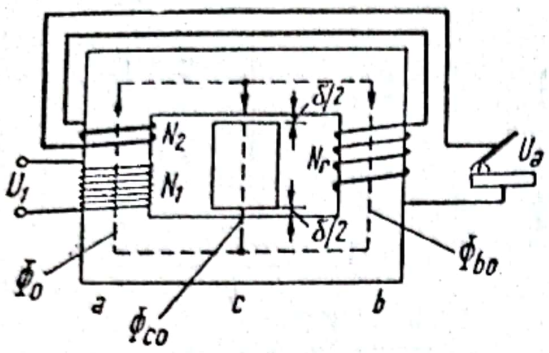


Fig. 4.17. Schema de principiu a transformatorului de sudare cu şunt magnetic.

În figura 4.17, este dată schema de principiu a transformatorului cu şunt magnetic (TASM 300) de construcţie românească, avînd curentul nominal $I_n = 300$ A.

Fenomenele ce au loc la funcţionarea transformatorului cu şunt magnetic sînt asemănătoare cu cele de la transformatorul de sudare cu inductanţă pe miez comun, înfăşurarea secundară de pe coloana *b* (legată în serie cu cea de pe colana *a*) comportîndu-se ca o bobină de reactanţă, ceea ce determină alura coborîtoare a caracteristicii externe. Coeficientul de cuplaj magnetic (rel. 4.14) între înfăşurarea primară N_1 şi cea de reacţie N_r este mare ($k_m = 0{,}7 \ldots 0{,}85$, în funcţie de poziţia şuntului — coloana *c*), astfel că t.e.m. ce se induce în înfăşurarea de reacţie participă în mod esenţial la obţinerea t.e.m a secundarului.

Mersul în gol. Tensiunea secundară la mersul în gol este suma t.e.m., în înfăşurările secundare, adică

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{20} + \underline{U}_{r_0}. \tag{4.13}$$

Luînd în considerare coeficientul de cuplaj magnetic dintre înfăşurarea primară şi cea de reacţie

$$k_m = \frac{\underline{\Phi}_{b_0}}{\underline{\Phi}_0} = \frac{\underline{\Phi}_{b_0}}{\underline{\Phi}_{b_0} + \underline{\Phi}_{c_\sigma}} \simeq \frac{R_{mc}}{R_{mc} + R_{mb}}, \tag{4.14}$$

în care Φ_0 este fluxul magnetic creat de înfăşurarea primară, Φ_{b_0} — fluxul care trece prin coloana *b*, înlănţuit de spirele înfăşurării de reacţie, Φ_{c_σ} — fluxul care trece prin şuntul magnetic, R_{mc}, R_{mb} — reluctanţa magnetică a şuntului magnetic, respectiv a coloanei *b*.

Relaţia (4.13) devine:

$$U_0 = 4{,}44\, f(N_2 + k_m N_r)\, \Phi_0, \tag{4.15}$$

deci raportul de transformare este

$$n = \frac{U_1}{U_0} = \frac{4{,}44\, f\, N_1 \Phi_0}{4{,}44\, f\, (N_2 + k_m N_r)\Phi_0} = \frac{N_1}{N_2 + k_m N_r}. \tag{4.16}$$

Prin variaţia coeficientului de cuplaj magnetic, adică a reluctanţei şuntului magnetic, se modifică tensiunea de mers în gol cu circa 4,5...10 V.

Mersul în sarcină. La mersul în sarcină fiecare dintre cele trei înfăşurări sînt parcurse de curenţi şi vor excita cîte un flux magnetic, transformatorul comportîndu-se similar cu transformatorul cu inductanţă pe miez comun.

Scanned with OKEN Scanner

Expresia tensiunii arcului este [73]

$$U_a \simeq \sqrt{U_0^2 - (X_T + X_r)^2 \cdot I_a^2}, \tag{4.17}$$

în care X_T este reactanţa înfăşurărilor primară şi secundară principală, iar

$$X_r = (1 - k_m^2)\frac{\omega \cdot N_r^2}{R_m} = \frac{\omega N_r^2}{R_{mb} + R_{mc}} \tag{4.18}$$

este reactanţa înfăşurării de reacţie,

$$R_m = R_{mb} + \frac{R_{ma} \cdot R_{mc}}{R_{ma} + R_{mc}} \tag{4.19}$$

fiind reluctanţa magnetică totală în drumul fluxului creat de această înfăşurare; în general $X_T \ll X_r$.

Mersul în scurtcircuit. Fenomenele se petrec la fel ca şi la transformatoarele prezentate anterior. Întrucît conexiunea directă a înfăşurării de reacţie conduce la creşterea curentului de lucru, secţiunea şuntului magnetic se alege pe baza condiţiilor de la mersul în scurtcircuit.

Curentul de scurtcircuit este dat de expresia

$$I_{sc} \simeq \frac{U_0}{X_r} = \frac{U_1(N_2 + k_m N_r)}{N_1} \cdot \frac{R_m}{(1 - k_m^2)\omega N_r^2}. \tag{4.20}$$

Reglarea regimului de sudare rezultă din relaţiile (4.17) şi (4.20):

— prin modificarea numărului de spire în înfăşurările secundare se obţine o variaţie în trepte a regimului de funcţionare. Pentru a se trece de la treapta I — curenţi de lucru mici, pînă la 200 A, la treapta II — curenţi de lucru mari pînă la 500 A, se reduce numărul de spire N_r şi se majorează N_2; în acest fel se modifică puţin tensiunea de mers în gol, scade reactanţa X_r şi creşte curentul de sudare.

— prin deplasarea şuntului magnetic, reluctanţa magnetică R_m variază continuu, ceea ce conduce la variaţia reactanţei X_r şi deci a curentului de lucru. La scoaterea şuntului, reluctanţa magnetică R_{mc} creşte întrucît se micşorează suprafaţa de trecere a fluxului magnetic prin şunt, deci reluctanţa magnetică totală R_m şi coeficientul de cuplaj magnetic k_m cresc şi curentul de sudare se măreşte.

În figura 4.18 sînt redate caracteristicile externe ale transformatorului TASM 300, în care curba *1* corespunde treptei I, cu şuntul magnetic complet scos, *2* — complet introdus, *3* — treapta II, cu şuntul magnetic complet scos şi *4* — complet introdus.

Scanned with OKEN Scanner

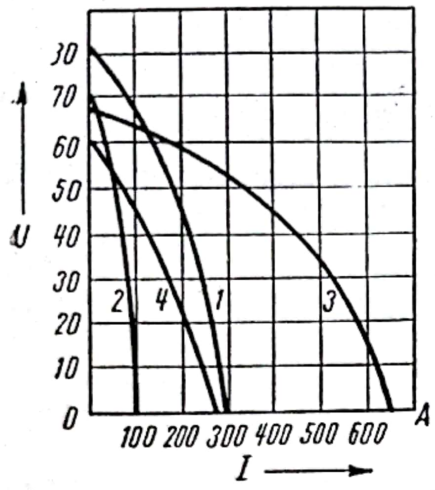


Fig. 4.18. Caracteristicile externe ale transformatorului cu şunt magnetic tip TASM 300.

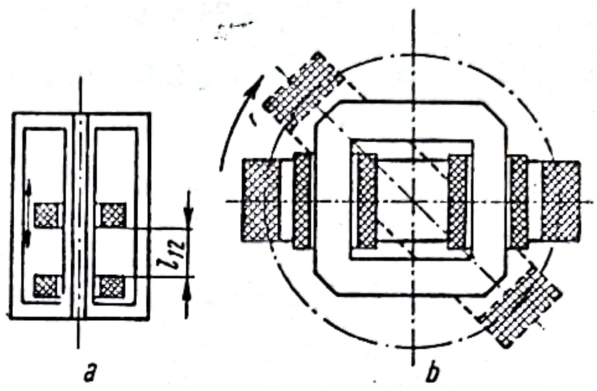


Fig. 4.19. Transformatoare de sudare cu bobine mobile:
a — cu deplasare longitudinală; *b* — cu rotire axială.

Transformatoare de sudare cu bobine mobile. La aceste transformatoare, fluxurile mărite de dispersie se obţin prin deplasarea longitudinală a înfăşurărilor (fig. 4.19, *a*), sau prin rotirea lor axială (fig. 4.19, *b*).

Prin modificarea distanţei l_{12} între bobine, se variază inductanţa şi deci reactanţa de scurtcircuit a transformatorului, întrucît fluxurile de dispersie ale înfăşurării primare şi secundare se închid prin spaţiul de aer dintre cele două bobine. Transformatorul se comportă ca un transformator cu şunt magnetic la care $N_2 = 0$.

Reglarea regimului de sudare se face în mod continuu prin variaţia distanţei l_{12}. Pe măsura îndepărtării bobinelor, cuplajul magnetic între înfăşurări scade, reactanţa transformatorului creşte şi deci, curentul sau tensiunea arcului scad în mod corespunzător.

Transformatorul prezentat în figura 4.19, *b* are trei înfăşurări — primară, secundară şi bobina rotitoare, primele două aşezate pe coloane diferite ale circuitului magnetic, iar cea de-a treia cuprinzînd ambele coloane ale sistemului magnetic. Bobina rotitoare este legată în serie cu înfăşurarea secundară.

Fluxul magnetic al bobinei rotitoare este un flux de dispersie, care se adună sau se scade cu fluxul de dispersie al jugului în funcţie de poziţia bobinei, astfel că reactanţa totală a transformatorului variază între o valoare minimă şi una maximă.

Reglarea regimului de sudare se face prin modificarea poziţiei sau a numărului de spire ale bobinei rotitoare.

Transformatoare pentru mai multe posturi de sudare (multipost). În secţiile de sudare mari este avantajoasă folosirea unui singur transformator care să alimenteze toate posturile de lucru din secţie. Transformatorul este

trifazat, cu caracteristică externă rigidă, fiecare post de sudare fiind prevăzut cu o bobină cu inductanţă variabilă (fig. 4.20).

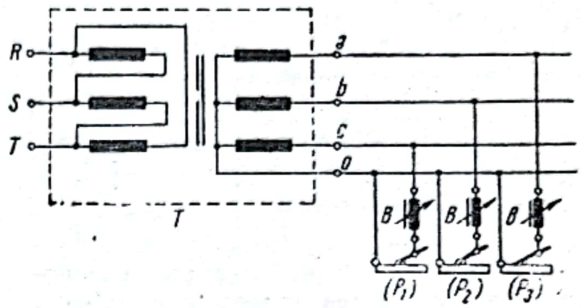


Fig. 4.20. Schema electrică a unui transformator de sudare multipost:
T — transformator trifazat; B — bobine cu inductanţă variabilă; P_1, P_2, P_3 — posturile de sudare.

Conexiunile înfăşurărilor transformatorului sînt: triunghi în primar, pentru păstrarea uniformităţii tensiunii primare în cazul unei sarcini dezechilibrate şi stea cu nul accesibil în secundar, pentru conectarea monofazată a posturilor de sudare.

Condiţia de funcţionare stabilă a sistemului este ca regimul de lucru al fiecărui post de sudare să fie independent faţă de celelalte, motiv pentru care caracteristica externă a transformatorului este rigidă; în acest fel tensiunea sursei de alimentare este independentă de sarcină.

Funcţionarea este identică cu a transformatorului de sudare cu inductanţă pe miez separat. Reglarea regimului de sudare se poate face numai prin modificarea inductanţei bobinei.

Printre avantajele utilizării transformatoarelor trifazate multipost faţă de transformatoarele monofazate monopost în număr corespunzător se menţionează:

— cheltuieli de investiţii şi exploatare mai reduse (40...50%, respectiv 70...75%);
— putere instalată mai mică cu 60...70%;
— randament şi coeficient mediu de utilizare mai mare.

Transformatoare pentru sudare cu arc trifazat sau cu două arcuri. Schema electrică a unui transformator trifazat utilizat în scopul sudării manuale cu doi electrozi paraleli (fig. 4.6, *a*) este redată în figura 4.21. Este un transformator trifazat T de construcţie normală cu o bobină de reactanţă B de construcţie specială avînd două miezuri: pe unul este înfăşurarea Z_3 în serie cu piesa de sudat, iar pe cealaltă sînt înfăşurările Z_1 şi Z_2 legate la cei doi electrozi. Inductanţa bobinei se reglează prin deplasarea jugurilor mobile.

Contactorul K serveşte pentru întreruperea sudării în momentul în care lipseşte arcul direct între electrozi şi piesă.

Maşini rotative de curent alternativ. Arcul electric de sudare fiind o sarcină în general monofazată, încarcă nesimetric reţeaua de alimentare. Pentru a repartiza această sarcină monofazată pe cele trei faze de alimentare, ca surse de sudare se pot folosi şi maşini rotative de curent alternativ trifazat.

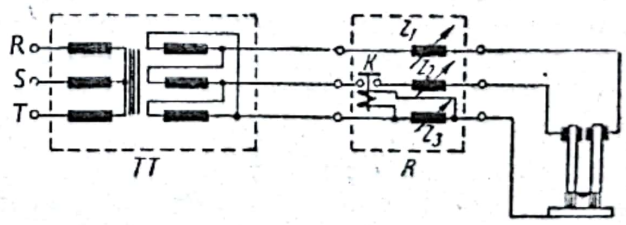


Fig. 4.21. Schema unui transformator trifazat de sudare.

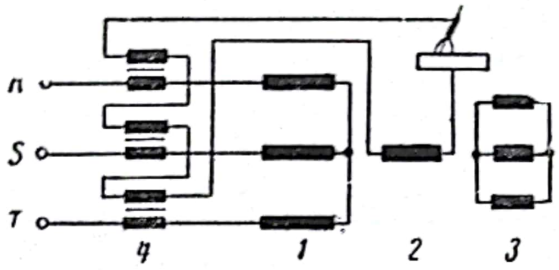


Fig. 4.22. Convertizor de sudare trimonofazat cu simetrizarea curenţilor în reţeaua de alimentare:

1 — înfăşurarea statorică trifazată; *2* — înfăşurarea statorică monofazată; *3* — înfăşurarea rotorică; *4* — transformatoare de simetrizare (de cuplare).

Convertizorul asincron trimonofazat este o maşină asincronă avînd statorul prevăzut cu două înfăşurări: una trifazată obişnuită şi una monofazată, pentru alimentarea circuitului de sudare; rotorul este de construcţie normală, în colivie sau cu inele.

Maşina funcţionează în gol în regim perfect simetric, iar la mersul în sarcină apare o oarecare nesimetrie, datorată t.m.m. pulsatorii create de curentul de lucru ce străbate înfăşurarea monofazată.

În figura 4.22 este dată schema unui convertizor trimonofazat în care s-a realizat o simetrizare automată totală a curenţilor în reţeaua de alimentare, la orice sarcină a convertizorului. Conform acestei scheme, pentru fiecare sarcină se produce o deformare de aşa natură a sistemului tensiunilor de alimentare, încît sistemul de curenţi absorbiţi de la reţea este simetric.

Generatoare pentru sudare cu arc electric cu frecvenţa mărită. În §.4.2.1., s-a arătat că stabilitatea arderii arcului electric de curent alternativ este mai redusă decît în curent continuu, deoarece în cursul fiecărei perioade curentul se întrerupe de două ori, şi că pentru a reduce cît mai mult timpul de deionizare a spaţiului arcului se poate mări frecvenţa curentului. Folosind curentul de frecvenţă mărită se scurtează timpul pînă la reaprinderea arcului, reducînd deionizarea coloanei arcului, după stingerea lui la sfîrşitul fiecărei semiperioade.

Frecvenţa pentru care se obţin rezultate bune este pînă la circa 500 Hz, sursele de alimentare utilizate fiind generatoarele sincrone monofazate tip Lorenz-Schmidt (descrise în §.3.3.4) şi generatoarele sincrone cu o înfăşurare monofazată pe stator, avînd rotorul prevăzut cu magneţi permanenţi.

Din punct de vedere al tehnologiei sudării, generatorul cu frecvenţă mărită este identic transformatorului cu frecvenţă industrială; faţă de generatorul de curent continuu însă, posibilităţile lui tehnologice sînt mai reduse, dar este mai ieftin şi mai sigur în funcţionare.

Utilaje pentru îmbunătăţirea aprinderii şi mărirea stabilităţii arcului electric. Pentru a uşura aprinderea şi reaprinderea arcului electric, respectiv pentru a mări stabilitatea de ardere a arcului de sudare mai ales în curent alternativ, se impune folosirea în acest scop a unor utilaje auxiliare. Ele îşi găsesc aplicare şi atunci cînd aprinderea arcului trebuie să aibă loc fără scurtcircuitarea electrozilor, cum ar fi cazul utilajelor cu jet de plasmă.

Utilajele auxiliare sînt fie oscilatoare de ionizare, fie excitatoare de impulsuri. Principiul de funcţionare constă în aplicarea unei tensiuni de valoare mare între electrod şi piesa de sudat în momentul trecerii prin zero a curentului de sudare. Datorită cîmpului electric intens format, în spaţiul arcului se produce o ionizare puternică, astfel încît reaprinderea arcului se face

Scanned with OKEN Scanner

pentru o tensiune redusă a sursei şi sub valoarea care ar fi necesară pentru reaprindere în lipsa dispozitivului auxiliar.

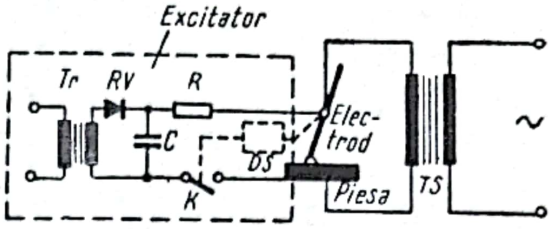


Fig. 4.23. Schema de principiu a unui excitator de impulsuri.

Oscilatoarele de ionizare generează oscilaţii amortizate de frecvenţe 250—300 kHz, 200—400 V în sarcină, oscilaţii rezultate prin descărcarea unui condensator prin intermediul unui eclator într-un circuit oscilant *LC*. Folosirea acestor oscilatoare permite utilizarea surselor de alimentare cu tensiunea de mers în gol redusă, pentru sudarea în atmosferă protectoare cu electrod nefuzibil sau la sudarea cu arc deschis cu curenţi mici, situaţii care necesită o tensiune mare de mers în gol.

Excitatoarele de impulsuri se utilizează tot mai mult în ultimul timp. Aceste utilaje trimit în spaţiul arcului impulsuri sincronizate de tensiune mărită în timpul reaprinderii arcului, în momentul trecerii curentului de sudare prin valoarea zero sau în momentul schimbării polarităţii tensiunii arcului. Spre deosebire de oscilatoare, excitatoarele de impulsuri asigură trimiterea unui singur impuls de tensiune relativ mare în spaţiul arcului, în fiecare semiperioadă a curentului de sudare.

Schema de principiu a unui excitator de impulsuri este reprezentată în figura 4.23. Transformatorul *Tr*, de putere mică şi ridicător de tensiune, încarcă condensatorul *C* cu ajutorul redresorului *RV* (de obicei un kenotron). La trecerea prin zero a curentului de sudare, dispozitivul de sincronizare *DS* comandă închiderea contactorului (tiratron) *K*. Imediat după darea impulsului de tensiune (250—300 V) în spaţiul arcului, contactorul *K* se deschide pentru ca să nu şunteze arcul electric. Rezistorul *R* serveşte pentru limitarea curentului la o valoare de 1,5—2 A.

Excitatoarele de impulsuri se folosesc la sudarea în atmosferă de argon cu electrod nefuzibil şi la sudarea sub strat de flux.

4.2.2.2. SURSE DE CURENT CONTINUU PENTRU SUDAREA CU ARC ELECTRIC

Sursele de alimentare ale arcului electric de curent continuu se împart în două grupe principale:

— *rotative*, cuprinzînd grupuri convertizoare şi agregate de sudare (grupuri electrogene), alcătuite din generatoare de sudare şi motoare de antrenare (motoare electrice la convertizoare, motoare oarecare la agregate);

— *statice*, cuprinzînd redresoarele de sudare.

Generatoarele de curent continuu pentru sudare. Aceste generatoare trebuie să satisfacă condiţiile impuse de arcul electric de curent continuu, şi anume: tensiunea minimă de aprindere, inerţia electromagnetică redusă, o gamă largă de variaţie a tensiunii şi curentului, posibilitatea cuplării în paralel cu alte generatoare etc.

Scanned with OKEN Scanner

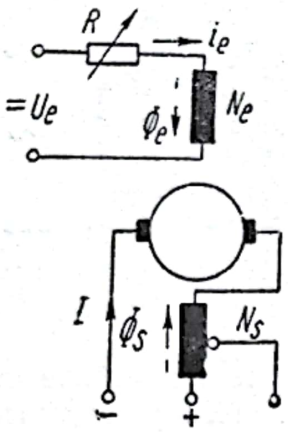


Fig. 4.24. Schema de principiu a generatorului de sudare cu excitaţie separată şi serie antagonistă.

Din teoria maşinilor de curent continuu se cunoaşte expresia tensiunii la bornele generatorului

$$U_g = E - I_g R_g = C\Phi_a - I_g R_g, \qquad (4.21)$$

în care E este tensiunea electromotoare indusă; I_g — curentul în indusul generatorului; R_g — rezistenţa ohmică totală a circuitului indusului; C — constanta generatorului; Φ_a — fluxul magnetic principal în întrefier, sub polul principal.

Caracteristica externă a generatorului exprimă dependenţa dintre tensiunea la bornele acestuia şi curentul de sarcină $U_g = f(I_g)$. Întrucît produsul $I_g R_g$ este mic faţă de U_g, pentru a se obţine caracteristica externă coborîtoare a sursei trebuie ca o dată cu creşterea sarcinii să scadă fluxul magnetic Φ.

Generatorul de sudare cu excitaţie separată şi serie antagonistă reprezintă tipul de bază al generatoarelor de curent continuu pentru sudare, întrucît toate celelalte, independent de principiul lor de funcţionare, pot fi reduse la acesta.

În figura 4.24 este redată schema de principiu a generatorului, cu două înfăşurări de excitaţie: — înfăşurarea de excitaţie separată (de magnetizare) alimentată cu tensiunea U_e şi parcursă de curentul de excitaţie i_e reglabil prin reostatul R, produce fluxul magnetic Φ_e; — înfăşurarea de excitaţie în serie cu indusul (de demagnetizare) străbătută de curentul de sarcină I care dă naştere unui flux magnetic Φ_s în opoziţie cu Φ_e.

Mersul în gol. La mersul în gol curentul de sarcină este nul, astfel încît în circuitul magnetic al maşinii apare numai fluxul magnetic produs de înfăşurarea de excitaţie separată

$$\Phi_e = \frac{N_e \cdot i_e}{R_{me}}, \qquad (4.22)$$

în care N_e este numărul de spire pe perechea de poli ai înfăşurării de excitaţie şi R_{me} — reluctanţa circuitului magnetic prin care se închide fluxul Φ_e.

T.e.m. E_0 indusă în înfăşurarea rotorică este egală cu tensiunea la mersul în gol la bornele generatorului U_0 (în rel. 4.21, $I_g = 0$):

$$E_0 = U_0 = C \cdot \Phi_e = C\frac{N_e \cdot i_e}{R_{me}} = C_1 N_e i_e. \qquad (4.23)$$

Din această relaţie rezultă că variind curentul de excitaţie i_e se obţin diferite valori ale tensiunii la mersul în gol.

Mersul în sarcină. În sarcină prin circuitul indusului apare curentul de sudare, astfel că $I_g = I$. Înfăşurarea serie excită fluxul magnetic Φ_s în opoziţie cu Φ_e, astfel că fluxul rezultant prin maşină este

$$\Phi = \Phi_e - \Phi_s, \qquad (4.24)$$

Scanned with OKEN Scanner

t.e.m. indusă

$$E = C \cdot \Phi = C\left(\frac{N_e \cdot i_e}{R_{me}} - \frac{N_s \cdot I}{R_{ms}}\right), \qquad (4.25)$$

R_{ms} fiind reluctanţa circuitului magnetic prin care se închide fluxul Φ_s, iar tensiunea la bornele generatorului, din relaţia (4.21)

$$U_g = C \cdot \Phi - I \cdot R_g = C_1(N_e \cdot i_e - N_s \cdot I) - I \cdot R_g, \qquad (4.26)$$

considerîndu-se că reluctanţele magnetice R_{me} şi R_{ms} sînt egale cu reluctanţa magnetică a întrefierului maşinii $R_{m\delta}$. Notînd $C_1 \cdot N_e = R_s$ (rezistenţă echivalentă) şi ţinînd cont de (4.23), se obţine

$$U_g = U_0 - I(R_e + R_g), \qquad (4.27)$$

relaţie valabilă pentru toate regimurile de lucru, de la mersul în gol pînă la mersul în scurtcircuit, în cazul în care sistemul magnetic este nesaturat la mersul în gol.

Mersul în scurtcircuit. La scurtcircuit tensiunea la bornele generatorului este nulă, deci fluxul prin miezul magnetic trebuie să producă o t.e.m. care să acopere căderea de tensiune pe rezistenţa R_g şi R_e

$$I_{sc} \simeq \frac{U_0}{R_e + R_g}. \qquad (4.28)$$

Reglarea regimului de sudare se poate face prin:

— modificarea tensiunii de mers în gol U_0 prin variaţia curentului de excitaţie i_e cu reostatul R;

— modificarea numărului de spire N_s al înfăşurării serie avînd ca efect variaţia acţiunii demagnetizante a înfăşurării serie;

— combinarea acestor metode, obţinîndu-se o variaţie continuă a domeniului de lucru prin prima metodă şi o variaţie în trepte prin metoda a doua.

În figura 4.25 sînt date caracteristicile externe $U_g = f(I)$ ale convertizorului de sudare tip CS—350, de construcţie românească.

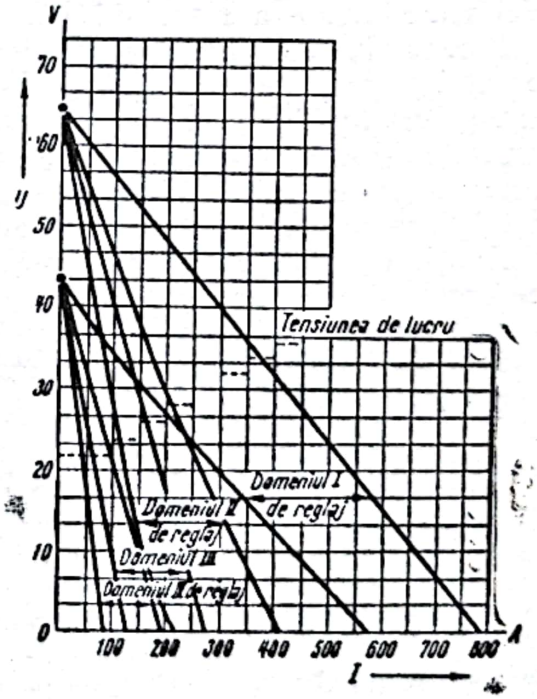


Fig. 4.25. Caracteristicile externe ale convertizorului de sudare tip CS—350.

Generatorul de sudare cu excitaţie în derivaţie şi serie antagonistă are sche-

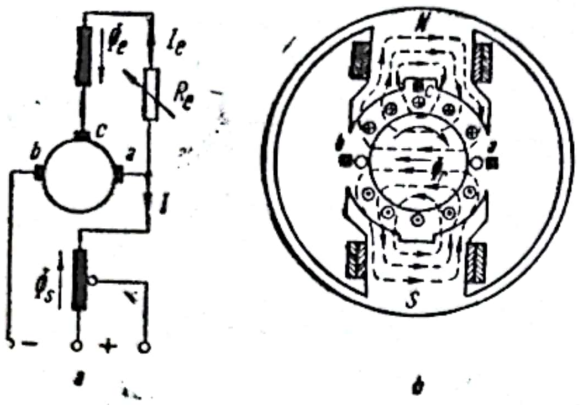


Fig. 4.26. Schema de principiu a generatorului de sudare cu excitaţie în derivaţie şi serie antagonistă (*a*); secţiune prin generator (*b*).

ma de principiu redată în figura 4.26, *a*. Locul excitaţiei separate, care necesită o sursă suplimentară de curent continuu, este luat în cazul acestui generator de o înfăşurare de excitaţie în derivaţie, alimentată de la una din periile principale *a* şi peria auxiliară *c*, aşezată pe colector între periile principale *a* şi *b*.

În scopul îmbunătăţirii condiţiilor de comutaţie ale periei auxiliare *c*, în tălpile polilor de excitaţie se practică crestături (fig. 4.26, *b*). Crestătura are rolul de a reduce inducţia în întrefier în dreptul zonei de comutaţie a periei, pentru ca t.e.m. indusă să nu fie prea mare.

Mersul în gol. Generatorul se comportă asemănător generatoarelor cu excitaţie în derivaţie, autoexcitîndu-se, fluxul în întrefier fiind produs numai de înfăşurarea în derivaţie. Procesul de autoexcitare se amorsează datorită prezenţei fluxului magnetic remanent. Tensiunea la bornele generatorului la mersul în gol este exprimată prin relaţia (4.23).

Mersul în sarcină. În sarcină, în întrefierul indusului apar trei fluxuri magnetice: fluxul Φ_e al înfăşurării de excitaţie derivaţie (de magnetizare), fluxul Φ_s al înfăşurării de excitaţie serie (de demagnetizare) şi fluxul reacţiei transversale a rotorului Φ_r.

Fluxul Φ_r se închide prin indus şi poli, astfel că pe jumătatea a—c a polului principal are acelaşi sens cu Φ_e, dar sens contrar cu Φ_s (care este antagonist lui Φ_e) şi se opune fluxului Φ_e pe cealaltă jumătate (b—c). Fluxurile Φ_r şi Φ_s sînt proporţionale cu curentul de sudare; prin anumite măsuri constructive se poate obţine ca suma celor două fluxuri sub jumătatea a—c a tălpii polare să se anuleze. În acest fel, tensiunea înfăşurării de excitaţie derivaţie U_{ac}, în sarcină, va fi practic constantă, iar excitaţia independentă de sarcină.

Sub jumătatea b — c a tălpii polare cele două fluxuri Φ_s şi Φ_r au acelaşi sens şi se opun fluxului de excitaţie Φ_e.

În sarcină, fluxul magnetic sub întreg polul este deci

$$\Phi = \Phi_{ac} + \Phi_{bc} = \left(\frac{1}{2}\Phi_e - \frac{1}{2}\Phi_s + \frac{1}{2}\Phi_r\right) + \left(\frac{1}{2}\Phi_e - \frac{1}{2}\Phi_s - \frac{1}{2}\Phi_r\right)$$

sau

$$\Phi = \Phi_e - \Phi_s, \qquad (4.29)$$

adică pentru tensiune şi curent vor rezulta relaţii identice cu cele ale generatorului cu excitaţie separată şi serie antagonistă atît la mersul în sarcină, cît şi la cel în scurtcircuit.

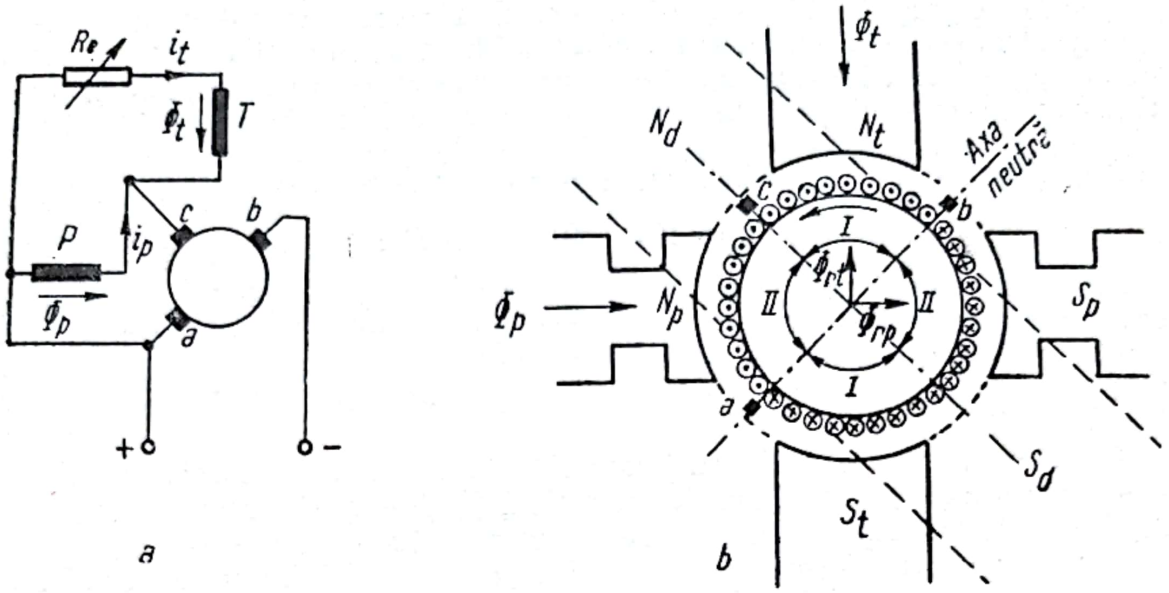


Fig. 4.27. Schema de principiu a generatorului de sudare cu poli divizați (*a*); secțiune prin generator (*b*).

Reglarea regimului de sudare se face în mod continuu, prin modificarea curentului de excitație i_e cu ajutorul reostatului R_e sau în trepte, prin schimbarea numărului de spire N_s ale înfășurării de excitație serie.

Generatorul de sudare cu poli divizați — figura 4.27, constituie o variantă constructivă a generatorului cu excitație în derivație și serie antagonistă, prezentînd o serie de particularități.

Pentru a se intensifica interacțiunea dintre fluxul de excitație și fluxul de reacție a indusului, polii mașinii N_d și S_d se divizează în cîte doi poli așezați la 90° (fig. 4.27, *b*). Polii N_p, S_p se numesc poli principali și au secțiunea micșorată prin crestături, miezul lor fiind astfel puternic saturat; polii N_t, S_t sînt poli transversali, cu secțiune mare și deci, miez nesaturat.

Sensul de rotație al indusului se alege astfel încît polii transversali să reprezinte partea de intrare, iar polii principali partea de ieșire a pasului polar.

Polii principali și cei transversali sînt excitați în derivație de la periile *a* și *c*, care culeg tensiunea indusă sub polii principali (fig. 4.27, *a*).

Conductoarele înfășurării rotorului pot fi divizate convențional în două grupe I și II ale căror axe magnetice sînt reciproc perpendiculare. Fluxul magnetic Φ_{rp} excitat de către grupa I de conductoare este îndreptat în direcția polilor principali, avînd tendința de a-i magnetiza. Cum însă polii principali sînt saturați, creșterea numărului de amperspire în direcția polilor principali nu va mai produce și creșterea inducției, respectiv a fluxului magnetic principal. Din această cauză reacția indusului nu are influență asupra fluxului principal și deci t.e.m. indusă între periile *a*-*c* rămîne practic constantă.

T.m.m. a grupului II de conductoare dă naştere fluxului Φ_{rt} care este îndreptat în sens contrar fluxului Φ_t al polilor transversali, avînd o acţiune de demagnetizare. La o anumită valoare a curentului în indus, fluxul total transversal ($\Phi_t - \Phi_{rt}$) poate deveni egal cu zero sau chiar să-şi schimbe sensul.

Tensiunea la periile principale ale generatorului este

$$U_{ab} = E_{ac} + E_{cb} - I \cdot R_g . \qquad (4.30)$$

Pe baza celor menţionate anterior, t.e.m E_{ac} nu depinde de variaţia curentului de sudare, caracterul căzător al caracteristicii externe a generatorului cu poli divizaţi fiind dat de variaţia t.e.m. E_{cb} cu curentul. La creşterea curentului I, t.e.m. E_{cb} scade, ceea ce atrage şi scăderea tensiunii U_{ab} (fig. 4.28).

Reglarea regimului de lucru poate fi făcută prin două metode:

— prin variaţia curentului de excitaţie i_t (reglaj continuu) ceea ce atrage după sine şi variaţia tensiunii de mers în gol;

— prin variaţia acţiunii demagnetizante a reacţiei indusului, realizată prin schimbarea poziţiei periilor $a - b$ faţă de axa neutră; deplasînd periile faţă de axa neutră în sensul de rotaţie al rotorului, acţiunea demagnetizantă a reacţiei indusului creşte şi curentul de sudare scade.

La construcţiile moderne de generatoare (generatorul românesc tip GES—350) se combină cele două posibilităţi de reglare.

Generatorul cu cîmp transversal — figura 4.29, se construieşte bipolar, pentru puteri mici. Polii generatorului au tălpile polare foarte mari, restul circuitului magnetic avînd secţiunea redusă. Generatorul are patru perii: două auxiliare *a*, *b* legate în scurtcircuit şi aşezate în axa neutră şi două perii principale *c*, *d* aşezate în axa polilor şi care alimentează circuitul de sudare.

Mersul în gol. Generatorul se autoexcită pe baza fluxului remanent Φ_{rem} al polilor, care induce între periile $a—b$ o t.e.m. Datorită faptului că

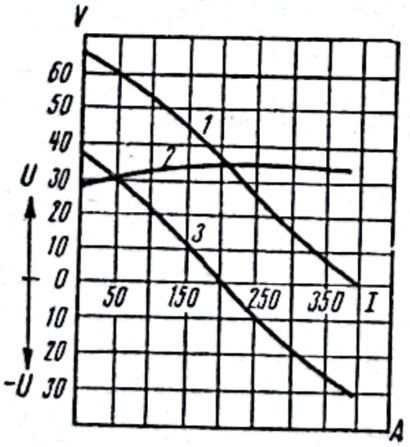


Fig. 4.28. Caracteristica externă U_{ab} (1), E_{ac} (2) şi E_{cb} (3) în funcţie de curentul de sudare, la generatorul cu poli divizaţi.

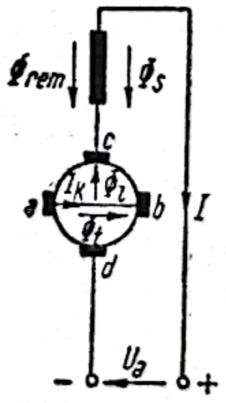


Fig. 4.29. Schema de principiu a generatorului cu cîmp transversal.

aceste perii sînt scurtcircuitate, prin indus ia naştere un curent intens I_k, ce excită un flux de reacţie transversală Φ_t, după axa periilor $a - b$. Acest flux transversal, ce se închide prin rotor şi tălpile polare are o valoare relativ mare pentru că circuitul magnetic are o reluctanţă mică. El constituie fluxul de excitaţie pentru înfăşurarea indusului (periile $c—d$). Tensiunea indusă la aceste perii reprezintă tensiunea de mers în gol a generatorului şi este cuprinsă în general între 30...40 V.

Mersul în sarcină. La închiderea circuitului de sudare se nasc fluxurile înfăşurării serie Φ_s şi fluxul de reacţie longitudinală Φ_l, generate de curentul I_a din circuitul principal şi îndreptate în axa polilor. Aceste fluxuri acţionează în sensuri contrare.

Fluxul rezultant este:

$$\Phi = \Phi_{rem} + \Phi_s - \Phi_l. \qquad (4.40)$$

Creşterea fluxului Φ_s la creşterea curentului de sudare este limitată datorită secţiunii relativ a mici a circuitului magnetic (jug, poli, indus) prin care se închide acest flux.

Concomitent cu aceasta, circuitul magnetic (tălpile polilor, indus) parcurs de Φ_l rămîne puţin saturat şi Φ_l creşte continuu cu creşterea curentului de sudare. Corespunzător cu aceasta va scădea Φ_t, precum şi tensiunea la periile principale $c - d$.

Deci la acest tip de generator fluxul transversal Φ_t este flux de lucru al generatorului, iar fluxul demagnetizant Φ_l serveşte pentru obţinerea caracteristicii externe coborîtoare a generatorului.

Mersul în scurtcircuit se caracterizează printr-o mică diferenţă între Φ_s şi Φ_l, necesară inducerii unei t.e.m. care să compenseze căderea ohmică în indus.

Reglarea regimului de sudare se poate face prin:

— modificarea reluctanţei circuitului magnetic prin care se închide Φ_s, cu ajutorul variaţiei secţiunii transversale a corpului polilor, ceea ce conduce la o reglare continuă a regimului de lucru;

— modificarea numărului de spire ale înfăşurării serie permite o reglare în trepte (I şi II în fig. 4.30).

Pentru obţinerea unei secţiuni variabile a corpului unui pol, acesta se construieşte sub forma unui cilindru gol, în care se introduce un piston (dop, miez) de oţel, deplasabil axial cu ajutorul unui şurub. La scoaterea pistonului din cilindru, corpul polului rămîne o simplă ţeavă cu pereţi subţiri, saturîndu-se la un flux mic. Prin introducerea pistonului în cilindru, corpul polului devine masiv, secţiunea lui creşte, saturarea apare la un flux mai mare, cu creşterea fluxului crescînd şi curentul de sudare.

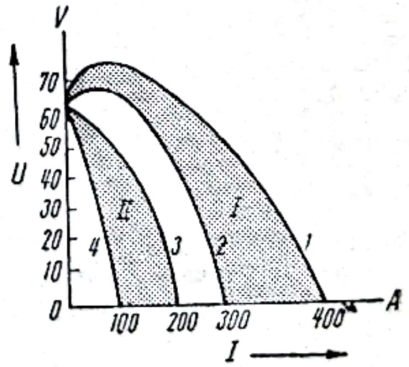


Fig. 4.30. Caracteristicile externe ale generatorului de sudare tip Cpv 443.

În figura 4.30 sînt redate caracteristicile externe de funcţionare ale generatorului de construcţie românească tip Cpv 443.

Generatoare pentru alimentarea mai multor posturi de sudare (multipost). Aceste generatoare au o caracteristică externă rigidă, tensiunea $U_g = U_0$ fiind constantă în limitele de $\pm 5\%$ (generator cu excitaţie mixtă, derivaţie şi serie în concordanţă), fiecare post de lucru fiind conectat la barele principale printr-un rezistor balast R_B. Caracteristica externă a sistemului este liniară coborîtoare, exprimată prin relaţia

$$U_g = U_a + R_B \cdot I, \tag{4.31}$$

în care I este curentul de sudare şi U_a — tensiunea arcului.

Reglarea curentului postului de sudare se face prin variaţia rezistenţei R_B a balastului în limite, în general, standardizate; reglarea tensiunii generatorului este posibilă cu ajutorul unui reostat R_d introdus în circuitul înfăşurării de excitaţie derivaţie.

Avantajele şi dezavantajele sistemelor multipost în curent continuu sînt similare celor de curent alternativ.

Redresoare pentru sudare. Aplicarea în tehnică a instalaţiilor de sudare cu redresoare are loc pe o scară tot mai largă, o dată cu progresele făcute în tehnica semiconductoarelor. Studii comparative efectuate asupra tipurilor principale de instalaţii de sudare au permis stabilirea avantajelor şi dezavantajelor utilizării redresoarelor — tabela 4.2.

Tabela 4.2

Date comparative ale instalaţiilor de sudare

Caracteristici	*Tipul instalaţiei pentru* 300 A		
	Convertizor cu generator de curent continuu	Instalaţie de redresoare	Transformator de sudare
Puterea consumată la mers în gol, în kW	3,70	0,64	0,75
Puterea consumată în plină sarcină de 300 A, în kW	19,40	18,46	15,20
Randament în %	61,50	65	80
Factor de putere	0,85	0,80	0,75
Consum mediu orar de energie la $DA = 60\%$, în kWh	13,11	11,336	9,42

Faţă de generatoarele de curent continuu pentru sudare, instalaţiile cu redresoare prezintă următoarele avantaje:

— randament mai mare;

— siguranţă mărită în funcţionare (deoarece lipsesc piese în rotaţie) şi simplitate constructivă ;

— proprietăţi dinamice mai bune (avînd inerţia electromagnetică mult mai mică).

Comparativ cu transformatoarele de sudare, instalaţiile trifazate de redresoare asigură o mare stabilitate de ardere a arcului, mai ales pentru curenţi mici, iar ca urmare tensiunea lor de mers în gol poate fi redusă.

Instalaţiile de sudare cu redresoare se execută :

— cu caracteristică externă brusc coborîtoare, pentru sudarea manuală cu arc electric şi pentru sudarea în gaz protector cu electrod nefuzibil ;

— cu caracteristică externă rigidă sau puţin înclinată, pentru sudarea cu electrod fuzibil în gaz protector ;

— cu caracteristică externă universală (coborîtoare şi rigidă).

Instalaţia se compune dintr-un transformator de alimentare şi redresorul propriu-zis. Transformatorul se execută cu dispersie mărită sau cu bobină de reactanţă separată, asigurînd tipul dorit al caracteristicii externe a instalaţiei.

La sudarea cu redresor monofazat, pulsaţia mare a curentului redresat şi trecerea prin zero a acestuia duce la o stabilitate a arcului electric cu puţin mai ridicată decît în cazul sudării în curent alternativ. Creşterea numărului de faze ale redresorului conduce la mărirea stabilităţii arderii arcului.

În figura 4.31 este reprezentată schema de principiu a instalaţiei de sudare cu redresoare de siliciu construită de ICET — Bucureşti. În această schemă, T_1 este transformatorul trifazat de alimentare, P_1 — puntea redresoare trifazată cu diode de siliciu şi AM — amplificatorul magnetic trifazat. Cele două înfăşurări de comandă IC_1 şi IC_2 ale amplificatorului magnetic sînt legate în serie şi sînt alimentate prin transformatorul T_2 şi puntea redresoare P_2. Cu ajutorul potenţiometrului R_1, înseriat în circuitul de comandă al amplificatorului magnetic se reglează regimul de sudare. Comutatorul C permite alimentarea înfăşurărilor de comandă pe una din cele două poziţii : a — în care tensiunea de comandă (sumă a tensiunii constante furnizate de grupul T_2—P_2 şi a tensiunii arcului) se aplică ambelor înfăşurări de comandă ; b — în care se alimentează o singură înfăşurare de comandă cu o tensiune redusă.

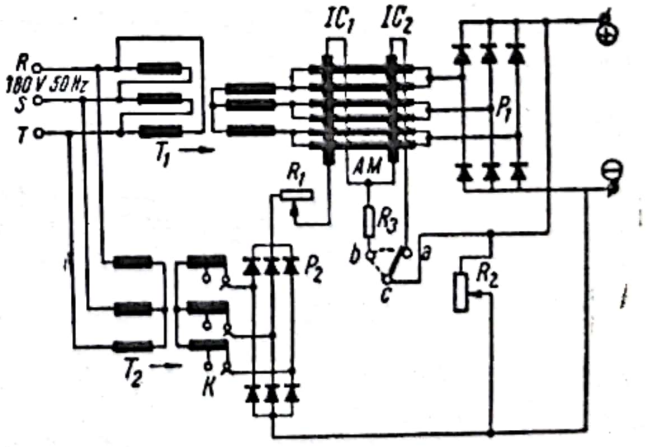


Fig. 4.31. Schema de principiu a redresorului de sudare tip ICET—1.

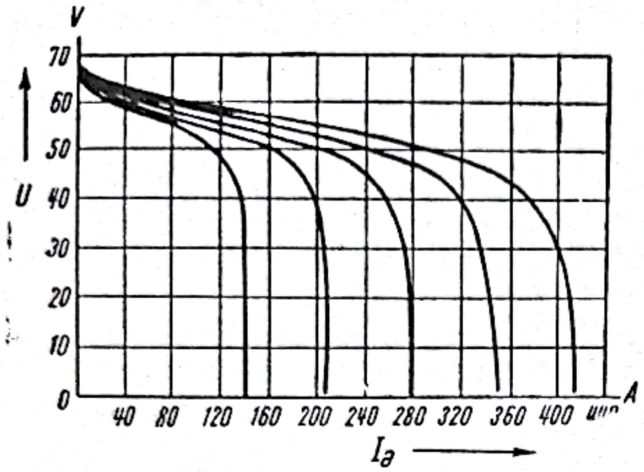


Fig. 4.32. Caracteristicile externe ale redresorului de sudare tip ICET—1.

La scurtcircuitarea redresorului, tensiunea aplicată înfăşurărilor de comandă este maximă, egală cu cea furnizată de puntea redresoare P_2; impedanţa amplificatorului AM este minimă, curentul de scurtcircuit are valoare mare. La creşterea distanţei electrod-piesă, tensiunea arcului creşte; tensiunea punţii P_2 şi a arcului fiind în opoziţie, curentul de comandă scade şi totodată scade şi curentul debitat.

Caracteristicile externe ale instalaţiei de sudare cu redresoare tip ICET sînt redate în figura 4.32.

4.2.2.3. COMPARAŢIA SURSELOR DE CURENT PENTRU SUDAREA CU ARC ELECTRIC

Analiza tehnico-economică a celor trei tipuri de surse de curent pentru sudare (transformator, generator, redresor) se face luîndu-se în considerare parametrii funcţionali, şi anume: — randamentul; — factorul de putere; — pierderile în gol; — consumul de curent, şi anumite caracteristici specifice: — perturbaţiile provocate reţelei de alimentare; — comportarea la sudare; — durabilitatea; — preţul de cost etc.

Curbele de variaţie ale randamentului şi factorului de putere în funcţie de curentul de sudare sînt redate în figura 4.33.

Avîndu-se în vedere avantajele şi dezavantajele diferitelor tipuri de surse de alimentare, în tabela 4.3. se dau recomandări asupra domeniilor de utilizare a surselor de alimentare.

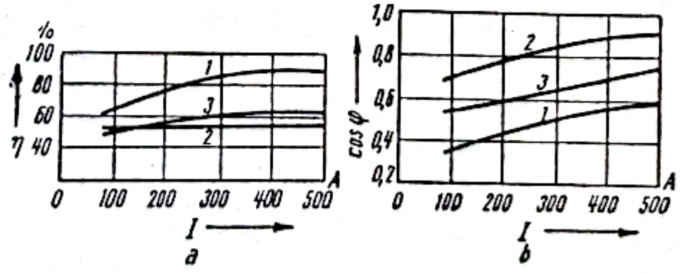


Fig. 4.33. Curbele de variaţie ale randamentului (*a*) şi factorului de putere (*b*) în funcţie de curent:
1 — transformatoare; *2* — generatoare de c.c.; *3* — redresoare.

Scanned with OKEN Scanner

Tabela 4.3

Domeniile de utilizare a surselor de alimentare

Felul curentului	Sursa de alimentare	Caracteristica exterioară	Domeniile de utilizare
Alternativ	Transformatoare de sudare de curent alternativ cu frecvenţă industrială (50 Hz)	Coborîtoare	Sudarea manuală cu arc electric, sudarea sub strat de flux, sudarea în gaze protectoare a aliajelor de aluminiu
		Rigidă	Sudarea sub strat de zgură
	Convertizoare rotative şi agregate mobile cu generatoare cu frecvenţă mărită (400—500 Hz)	Coborîtoare	Sudarea manuală cu arc electric
Continuu	Convertizoare rotative, redresoare, agregate mobile cu motoare cu ardere internă	Coborîtoare	Sudarea manuală cu arc electric, sudarea sub strat de flux, sudarea sub gaze protectoare cu electrod nefuzibil
		Rigidă	Sudarea mecanizată în medii de gaze protectoare cu electrod fuzibil, sudarea sub strat de flux, sudarea sub strat de zgură

4.2.3. Sudarea automată cu arc electric

La sudarea manuală sau automată cu arc electric, reglarea regimului de sudare urmăreşte menţinerea parametrilor de lucru (curentul, tensiunea şi lungimea arcului) la valorile prescrise.

La sudarea manuală cu electrod fuzibil, regimul de sudare se păstrează prin menţinerea manuală a lungimii arcului, electrodul — pe măsura topirii sale — fiind apropiat de piesă ; sursa de alimentare este reglată pe o anumită caracteristică externă.

La sudarea automată, apropierea de piesă a sîrmei — electrod, pe măsura topirii, se face cu ajutorul unui sistem de reglare automată ; viteza de avans a sîrmei poate fi constantă sau variabilă în funcţie de curentul sau tensiunea pe arc.

La o caracteristică externă rigidă a sursei de alimentare, abaterile regimului de sudare sînt însoţite de mici modificări ale curentului şi mari variaţii ale tensiunii arcului ; de aceea ca mărime reglabilă se alege de obicei tensiunea.

Scanned with OKEN Scanner

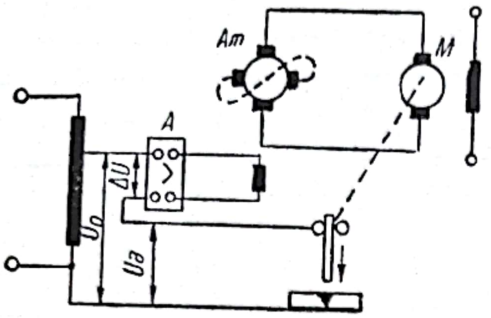


Fig. 4.34. Schema de reglare automată a sudării, cu viteză de avans a sîrmei-electrod variabilă în funcţie de tensiunea arcului.

În figura 4.34 este reprezentată schema de reglare automată a sudării, viteza de avans a sîrmei-electrod fiind variabilă în funcţie de tensiunea arcului U_a.

Mărimea de intrare a sistemului de reglare $\Delta U = U_0 - U_a$, în care U_0 este tensiunea de referinţă, amplificată de amplificatorul A este aplicată înfăşurării de excitaţie a amplidinei A_m. Motorul de curent continuu M, comandat pe indus va deplasa sîrma-electrod cu o viteză care depinde de mărimea tensiunii ΔU.

În cazul în care sursa de alimentare are mai multe caracteristici externe, tensiunea sau curentul arcului pot fi menţinute constante prin reglarea automată a regimului de lucru al sursei, punctul de funcţionare stabilindu-se (la perturbarea tensiunii sau a curentului) pe o altă caracteristică externă.

4.3. SUDAREA ELECTRICĂ ÎN BAIE DE ZGURĂ

Procedeul de sudare în baie de zgură se bazează pe dezvoltarea căldurii datorită trecerii curentului electric prin zgură topită. În figura 4.35 este dată schema acestui procedeu. Rosturile pieselor de sudat sînt prinse între patinele de cupru *1* răcite cu apă. În spaţiul format se topeşte fluxul *6* cu ajutorul sîrmei-electrod *2*, obţinîndu-se baia de zgură topită *3*. Temperatura zgurei fiind superioară temperaturii de topire a electrodului şi a pieselor de sudat, metalul sîrmei-electrod şi a marginilor pieselor se topeşte şi se depune pe fundul băii de zgură, formînd baia de metal *4*. Prin răcirea forţată şi deplasare pe verticală a patinelor împreună cu întregul dispozitiv de sudare, se asigură formarea continuă a cusăturii verticale *5*.

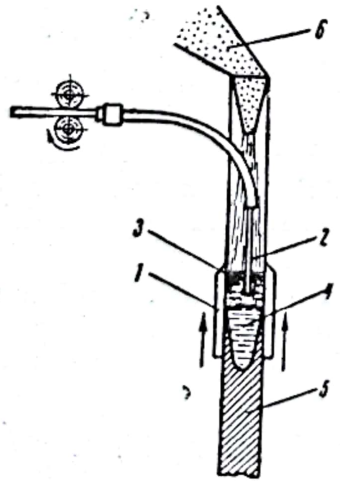


Fig. 4.35. Sudarea electrică în baie de zgură.

În cazul cusăturilor mai groase de 50...60mm se imprimă electrodului o deplasare transversală alternativă în direcţia grosimii pieselor sau se folosesc mai mulţi electrozi.

Sudarea electrică în baie de zgură este caracterizată prin formarea dirijată a sudurii şi prin lipsa arcului de sudare, prezentînd o serie de avantaje faţă de sudarea cu arc, în general, şi faţă de sudarea sub strat de flux, în special: degazarea mai redusă; — consum de energie electrică şi material de adaus mai scăzut; — reglaj precis al compoziţiei chimice a cusăturii;

— posibilitatea de sudare a tablelor de grosimi mari, fără pregătirea rosturilor.

Pentru trecerea rapidă de la regimul inițial de arc electric, cînd se formează baia de zgură, la regimul de lucru normal, sînt necesare condiții nefavorabile stabilității arcului electric, și anume : tensiunea de mers în gol trebuie să fie mică, iar în paralel cu arcul electric se leagă o rezistență ohmică.

În acest scop, sursa de alimentare trebuie să aibă caracteristica externă rigidă, randament mare și factor de putere ridicat. Caracteristica externă rigidă va asigura modificări mari ale curentului la variații mici ale regimului de topire, ceea ce conduce la restabilirea rapidă a regimului de sudare inițial.

Sursele de alimentare a instalațiilor de sudare în baie de zgură pot fi :

— Surse de curent continuu (generatoare de sudare cu caracteristici externe rigide).

— Surse de curent alternativ de frecvență industrială și anume transformatoare trifazate, cu caracteristică externă rigidă. Reglarea regimului de sudare se face prin variația tensiunii secundare, modificînd numărul de spire al înfășurării secundare.

— Surse de curent alternativ de înaltă frecvență. Prin utilizarea frecvențelor înalte (de exemplu 8 000 Hz) se obține o mărire a rezistenței active a circuitului de sudare datorită efectului pelicular, ceea ce permite mărirea productivității sudării la un același curent de sudare și micșorarea gabaritului transformatoarelor de alimentare.

Aparatele pentru sudarea în baie de zgură trebuie să asigure trei elemente principale : — păstrarea automată a poziției patinelor de formare a băii, față de nivelul băii de metal topit ; — deplasarea dispozitivului de sudare de-a lungul cusăturii, de jos în sus ; — introducerea sîrmei — electrod în baia de zgură, cu o viteză constantă.

Obținerea unei suduri de bună calitate este legată de păstrarea neschimbată a regimului de sudare în procesul de sudare. Sistemele de reglare automată urmăresc, în special, nivelul băii de metal și tensiunea din zona de sudare.

Dacă se modifică regimul de sudare (de exemplu, distanța dintre patine crește brusc), pentru menținerea nivelului băii trebuie modificată viteza de avans a electrodului (metodă neutilizată întrucît înrăutățește calitatea sudurii), sau viteza de deplasare a patinelor. Pentru aceasta, însă, este necesar un element de măsurare a nivelului băii metalice topite, transformînd mărimea măsurată într-o mărime electrică de comandă. Pentru măsurarea nivelului băii topite se folosește sonda electrică orizontală montată în patină (fig. 4.36), măsurîndu-se căderea de tensiune între sondă și piesele de sudat. Dacă tensiunea sondei este nulă, deci nivelul băii metalice este deasupra sondei, are loc scurtcircuitarea sondei și motorul de antrenare a

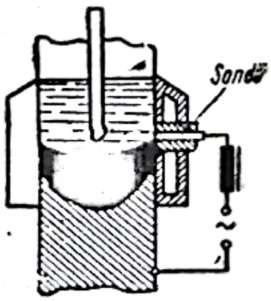


Fig. 4.36. Măsurarea nivelului băii metalice cu sonda electrică orizontală.

patinelor le va deplasa rapid în sus, cu o viteză mai mare decît viteza de creştere a nivelului băii ; invers, cu creşterea tensiunii sondei scade proporţional viteza de deplasare a patinelor.

4.4. SUDAREA CU PLASMĂ

Sudarea cu plasmă face parte din grupa procedeelor de sudare prin topire pe cale electrică în mediu de gaze, apropiindu-se cel mai mult de procedeul de sudare în mediu de argon cu electrod nefuzibil.

Instalaţiile cu plasmă utilizate în tehnica sudării sînt de două tipuri principale :

— cu arc de plasmă, la care plasma se formează prin strangularea unui arc electric care se menţine între un electrod nefuzibil de wolfram şi piesele de sudat (fig. 4.37, *a*) ;

— cu jet de plasmă, arcul fiind menţinut între un electrod nefuzibil şi duza de strangulare a generatorului de plasmă (fig .4.37, *b*).

În cele ce urmează se va arăta modul de obţinere a plasmei. Între electrodul *1* şi ajutajul de cupru *2* (fig. 4.37, *a*) conectat la polul pozitiv al sursei de curent continuu *G* prin intermediul rezistorului *R*, se aprinde un arc electric. Trecînd prin spaţiul arcului pilot un gaz plasmagen (argon, hidrogen, azot sau amestec într-o anumită proporţie al acestora) sub presiune, el se va ioniza şi va forma jetul de plasmă *6*. Dacă spaţiul descărcării este suficient de ionizat şi cîmpul electric exterior (dintre electrod şi piesă) suficient de puternic, prin spaţiul jetului de plasmă se formează arcul de plasmă *5* (mişcarea dirijată a particulelor electrizate), pata anodică mutîndu-se de pe ajutaj pe piesă.

Amorsarea arcului pilot se face fie prin micşorarea distanţei dintre electrod şi ajutaj, fie prin folosirea oscilatoarelor de înaltă frecvenţă, care generează o tensiune de 1 000 ... 5 000 V la o frecvenţă de 0,2...1 MHz.

Jetul fierbinte de plasmă suferă o strangulare mecanică, datorită contactului cu duza răcită intens, deoarece răcirea straturilor periferice ale

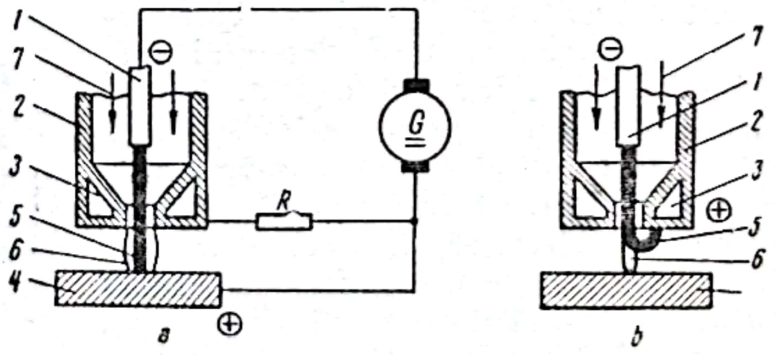


Fig. 4.37. Schema de principiu a generatorului de plasmă :
a — cu arc de plasmă ; *b* — cu jet de plasmă ; *1* — electrod ; *2* — ajutaj de cupru ; *3* — cameră de răcire ; *4* — piesă metalică ; *5* — coloana arcului electric ; *6* — jetul de plasmă ; *7* — gaz plasmagen.

Scanned with OKEN Scanner

gazului îl deionizează şi, ca urmare, secţiunea coloanei ionizate va scădea; apare şi o strangulare electromagnetică, datorită atracţiei curenţilor electrici paraleli. Cele două efecte cumulate conduc la reducerea secţiunii jetului de plasmă cu 20...50% faţă de secţiunea minimă a duzei.

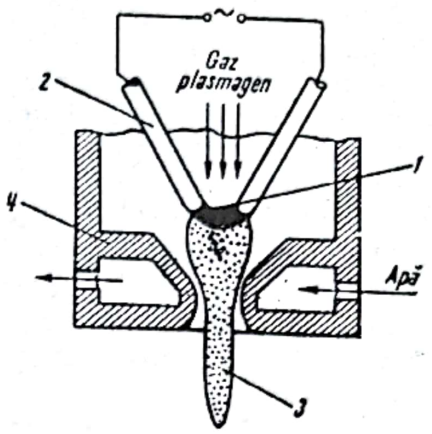


Fig. 4.38. Generarea plasmei cu ajutorul arcului electric de curent alternativ.

După sursele de alimentare a generatoarelor de plasmă se poate face următoarea clasificare:

— Plasma produsă cu ajutorul unui arc electric alimentat în curent continuu. Instalaţiile de lucru au puteri de cîteva sute de kW, curenţi pînă la 500 A şi temperaturi cuprinse între 6 000... 15 000°K.

— Plasma obţinută cu ajutorul unui arc de curent alternativ (fig. 4.38), utilizată în instalaţii cu puteri ce depăşesc 100 kW. Arcul electric *1* se produce între electrozii *2* alimentaţi de la sursa de curent alternativ; jetul de plasmă *3*, obţinut prin ionizarea gazului este concentrat de ajutajul de cupru *4*, răcit cu apă.

— Plasma produsă de un curent de înaltă frecvenţă, pentru instalaţii de ordinul kilowaţilor, la temperaturi de circa 6 000°K.

S-a arătat anterior (§.4.2.1) că arcul de plasmă are o caracteristică statică crescătoare, ceea ce impune utilizarea unor surse de alimentare cu energie electrică cu caracteristici externe căzătoare. Întrucît tensiunea necesară de mers în gol are valori ridicate (pînă la 300...400 V), se folosesc surse speciale (convertizoare rotative sau transformatoare), care pe lîngă forma dorită a caracteristicii externe asigură şi tensiunea de mers în gol. În lipsa acestora se pot conecta în serie două sau trei surse utilizate la sudarea manuală cu arc electric.

Sudarea cu plasmă se poate aplica practic oricărui metal sau aliaj metalic şi prezintă importante avantaje în diferite domenii industriale, ca de exemplu la: sudarea ţevilor de oţel inoxidabil, executarea de îmbinări circulare la ţevi de cupru-nichel, sudarea metalelor greu fuzibile sau reactive (titan, zirconiu), în tehnica spaţială etc.

4.5. SUDAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI

Procedeul de sudare cu fascicul de electroni utilizează energia cinetică a electronilor emişi de catodul unui tun electronic, care se transformă în energie termică prin ciocnire cu piesele ce urmează a fi sudate.

Instalaţia se compune din tunul electronic (sursa de electroni), camera de vid (în care se introduc piesele de sudat), sistemul de vidare şi sursa de alimentare cu energie electrică (§.3.6).

Scanned with OKEN Scanner

Instalaţiile pentru sudarea în vid cu fascicul de electroni se deosebesc după :

— domeniul de utilizare, putînd fi universale, pentru sudarea diferitelor piese în orice poziţie şi specializate, camera de lucru fiind dimensionată pentru o anumită piesă de sudat ;

— tensiunea de accelerare a electronilor : de joasă tensiune (20...30 kV) ; de medie tensiune (40...60 kV) ; de înaltă tensiune (100...150 kV).

Avantajele acestui procedeu de sudare constau în :

— reglarea precisă a zonei sudate, putîndu-se obţine fascicule focalizate avînd diametrul de 1...50 μm ;

— puterea specifică în pata focală are valori foarte ridicate (pînă la 250 kW/mm²) ;

— pătrunderea este totală pe întreaga grosime a pieselor suprapuse, raportul între adîncimea de topire şi lăţimea cusăturii fiind în medie de 10:1 ;

— sudarea se execută în aceeaşi direcţie cu fasciculul de electroni ;

— zona influenţată termic este extrem de redusă ; fenomenul de topire este atît de rapid, încît piesele de sudat înmagazinează foarte puţină energie termică, nefiind astfel supuse deformărilor ;

— pot fi sudate piese oricît de subţiri cu piese oricît de groase, deoarece sudarea cu fascicul de electroni nu depinde de conductivitatea termică a materialelor de sudat.

Pentru sudarea metalelor avînd grosimi de 30...40 mm este necesară o putere de 6 kW, iar pentru piese de grosime 100...120 mm puterea este de 25 kW.

Reglarea curentului de sudare în funcţie de adîncimea de topire necesară, se realizează prin modificarea tensiunii pe electrodul de comandă al tunului electronic sau prin modificarea regimului termic al catodului.

Procedeul permite îmbinarea oricăror metale, chiar ale celor refractare sau de mare puritate, ca uraniu, molibden, tantal, beriliu etc.

La început sudarea cu fascicul de electroni a fost rezervată domeniilor speciale, cum ar fi sudarea containerelor pentru combustibil nuclear, elementelor de rachete sau instrumentelor spaţiale ; în prezent îşi găseşte aplicaţie la fabricaţia de serie mare a pieselor de oţel în construcţia de maşini.

Pentru a mări accesibilitatea acestui procedeu modern şi economic, s-au realizat instalaţii de sudare în exteriorul camerei de vid. Fasciculul de electroni format în vid cu ajutorul tunului electronic, ajunge în atmosferă după parcurgerea unor camere cu vid parţial, ce comunică între ele prin mici orificii. În atmosferă, fasciculul de electroni este disipat de particulele de gaz, astfel că pata focală îşi măreşte diametrul, ceea ce îi scade puterea specifică. De aceea, sudarea se face la o distanţă de lucru de maximum 12 mm, puterea specifică pe suprafaţa piesei ajungînd pînă la 100 kW/mm². Cu aceste instalaţii se pot suda piese metalice de grosime 10 pînă la 25 mm.

Metoda sudării cu fascicul de electroni în exteriorul camerei de vid se foloseşte în industrie la sudarea paletelor turbinelor pentru avioane, sudarea rezervoarelor de mare presiune, etc.

Scanned with OKEN Scanner

4.6. SUDAREA CU FASCICUL DE LUMINĂ (LASER)

Sudarea cu fascicul de lumină este un procedeu de sudare prin topire, la care sursa termică este căldura cedată de un fascicul de lumină la ciocnirea cu piesele de sudat.

Laserul (lumină amplificată prin stimularea emisiei radiației) este un dispozitiv ce emite o radiație luminoasă coerentă extrem de monocromatică, avînd o intensitate energetică ridicată.

Dispozitivul laser cel mai cunoscut este cel cu rubin — figura 4.39 și se compune dintr-o lampă de pompaj (cu xenon), cu emisie luminoasă instantanee, ce înconjoară o baghetă de rubin (rezonatorul), ale cărei capete sînt argintate, constituind suprafețe reflectoare (reflectorul din stînga are un factor de reflexie de 100%, iar cel din dreapta, ceva mai mic). În stare de echilibru atomic, nivelele energetice inferioare E_1 ale atomilor de rubin sînt mai ocupate decît cele superioare E_3. Excitînd atomii cu radiația produsă de lampa de pompaj, avînd lungimea de undă λ_{21}, electronii vor trece de pe nivelul E_1 pe E_3, de unde vor cădea spontan, fără emisie de lumină, pe nivelul E_2, realizînd o populare majoritară a nivelelor energetice superioare. Această stare se numește „inversiune de populație", iar procesul prin care se formează inversiunea — „pompaj". Trecerea electronilor pe nivelul de bază poate avea loc spontan, cu o emisie luminoasă slabă avînd lungimea de undă λ_{21}, sau stimulat, sub acțiunea radiației luminoase de o aceeași lungime de undă a unui alt atom. Emisia luminoasă stimulată are o intensitate energetică extrem de ridicată și aceeași lungime de undă λ_{21}.

Amplificarea radiației și formarea unui fascicul îngust are loc în rezonator. Radiațiile emise în direcția axei optice sînt reflectate de extremitățile rezonatorului, trec din nou prin substanța activă și se amplifică în mod continuu, sub formă de avalanșă. Atingînd o anumită intensitate energetică, fasciculul de lumină părăsește rezonatorul prin suprafața reflectoare cu factor de reflexie mai mic.

Fasciculul de lumină astfel obținut posedă o înaltă monocromaticitate, coerență (radiația tuturor atomilor este în fază, în timp și în spațiu), direcționalitate (unghiul de divergență 0,1...1°) și intensitate energetică foarte mare (semnalul unui

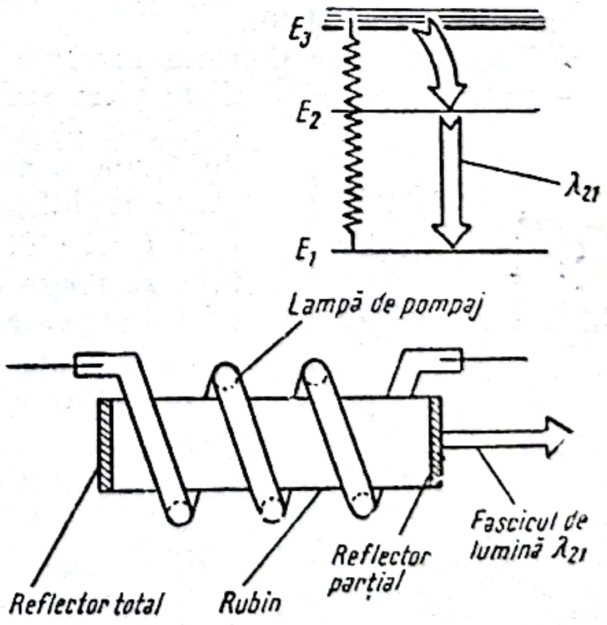


Fig. 4.39. Principiul laserului cu rubin.

laser cu rubin cu o suprafaţă de 0,2 cm² este de 1 kW într-un impuls de 10^{-3}s).

Alegerea materialului activ al laserului este destul de limitată, întrucît trebuie să fie posibilă o populare ridicată a nivelelor emergetice superioare, lumina emisă prin tranziţia electronilor să aibă o durată lungă de viaţă şi în sfîrşit, nivelul inferior să poată fi depopulat prin pompaj.

Generatoarele laser se pot clasifica după mediul activ utilizat, în:

a. Laseri cu mediu activ solid. Cel mai cunoscut este laserul cu rubin care emite semnalele sub formă de impulsuri, avînd puteri de ordinul megawaţilor; se emit cîteva impulsuri pe minut, fiecare impuls conţinînd cîteva sute de pulsuri scurte, cu durata de cîteva μs fiecare, la un interval de 5... ...10μs. Distanţa dintre pulsuri scade cu cît creşte puterea de pompaj. În prezent se fabrică şi laseri cu mediu activ solid cu radiaţie continuă, însă cu puteri de cîteva zeci de miliwaţi.

Alte materiale utilizate în construcţia laserilor cu mediu activ solid sînt: fluorura de calciu, stronţiu, bariu, elemente semiconductoare etc.

b). Laseri cu mediu activ lichid, utilizează compuşi organici în care sînt înglobaţi ioni de pămînturi rare; nu cunosc însă răspîndire practică.

c) Laseri cu mediu activ gazos (heliu, neon, CO_2, argon, cripton, xenon, cesiu etc.); sînt inferiori laserilor solizi din punct de vedere al puterii furnizate (P_{max} = 10 kW), dar prezintă avantaje foarte mari în privinţa coerenţei, direcţionalităţii, monocromaticităţii radiaţiei emise şi continuităţii semnalului emis.

Pompajul necesar inversării de populaţie se realizează printr-o descărcare electrică în gazul activ introdus într-un tub de sticlă, avînd la capete cîte o oglindă din oţel inoxidabil — rezonatorul.

În tehnica sudării se folosesc laserii cu mediu activ solid şi gazos. Instalaţiile de sudare se compun din dispozitivul laser şi sursa de alimentare cu impulsuri (fig. 4.40).

Sudarea cu laser prezintă următoarele caracteristici funcţionale:

— pătrunderea căldurii în piesa sudată este foarte redusă faţă de alte procedee de sudare prin topire, ceea ce atrage după sine o zonă îngustă influenţată termic şi o răcire rapidă;

— fasciculul laser are o mare densitate de putere, se poate concentra la diametre focale foarte mici şi se poate îndrepta uşor asupra locului sudat;

— se poate suda şi în locuri greu accesibile, cu condiţia de a exista o linie de lumină naturală;

— este posibilă sudarea prin sticlă şi în orice mediu transparent radiaţiilor infraroşii.

Energia de ieşire, deci regimul de lucru se poate regla continuu, prin modificarea tensiunii lămpii de pompaj.

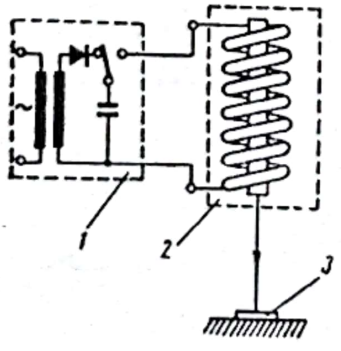


Fig. 4.40. Elementele instalaţiei de sudare cu laser: *1* — sursă de alimentare cu impulsuri; *2* — dispozitivul laser; *3* — piesa de sudat.

Scanned with OKEN Scanner

Posibilităţile de aplicare a procedeului sînt limitate de randamentul scăzut (0,1...2%) şi de costul ridicat al instalaţiei. Sudarea cu laser completează procedeele de sudare uzuale, mai ales la sudarea pieselor foarte mici din metale cu puncte înalte de topire.

4.7. SUDAREA ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE

4.7.1. Generalităţi

Procedeele de sudare electrică prin presiune combină deformarea plastică a pieselor de sudat cu încălzirea electrică prin efect Joule-Lenz, obţinută prin trecerea curentului electric alternativ de frecvenţă industrială sau înaltă. Încălzirea pieselor se poate realiza în aer, în vid sau într-un mediu gazos protector.

Procedeele de sudare electrică prin presiune se pot clasifica după forma îmbinării, în : sudare cap la cap, prin puncte, în linie (cusătură) şi prin relief ; domeniile de aplicare ale diferitelor procedee sînt indicate în tabela 4.4.

Tabela 4.4

Domeniile de aplicare ale principalelor procedee de sudare electrică prin presiune

Procedeul de sudare	Domeniul de aplicare
Cap la cap	Prelungirea elementelor de construcţie (sudarea şinelor, a serpentinelor din ţevi la construcţia de cazane, a benzilor de oţel în producţia de laminate, a barelor pentru armarea betonului etc.). Îmbinarea pieselor din metale şi aliaje diferite (sudarea oţelului rapid cu cel obişnuit în producţia de scule, sudarea oţelului termorezistent cu cel obişnuit la executarea supapelor de motoare etc.). Executarea unor piese de formă complicată din profile simple (sudarea carcasei axului cardanic al automobilelor, din ţevi şi flanşe, sudarea axului cardanic etc.).
Prin puncte	Îmbinarea tablelor şi profilelor din oţel şi metale neferoase, pentru obţinerea carcaselor şi învelitoarelor (sudarea elementelor vagoanelor complet metalice, a încrucişărilor de nervuri, în construcţia de automobile). Executarea unor construcţii din tablă subţire de configuraţie complicată (uşile de automobil etc.) . Realizarea reţelei de armături pentru beton armat (sudarea în cruce a barelor).
În linie	Obţinerea unor cusături compacte şi rezistente la piesele din oţel şi metale neferoase (sudarea rezervoarelor, automobilelor şi avioanelor, sudarea frigiderelor electrice, a ambalajelor, a exctinctoarelor, a ţevilor îndoite etc.).
Prin relief	Sudarea pieselor mici în producţie de masă (construcţia de automobile etc.).

Scanned with OKEN Scanner

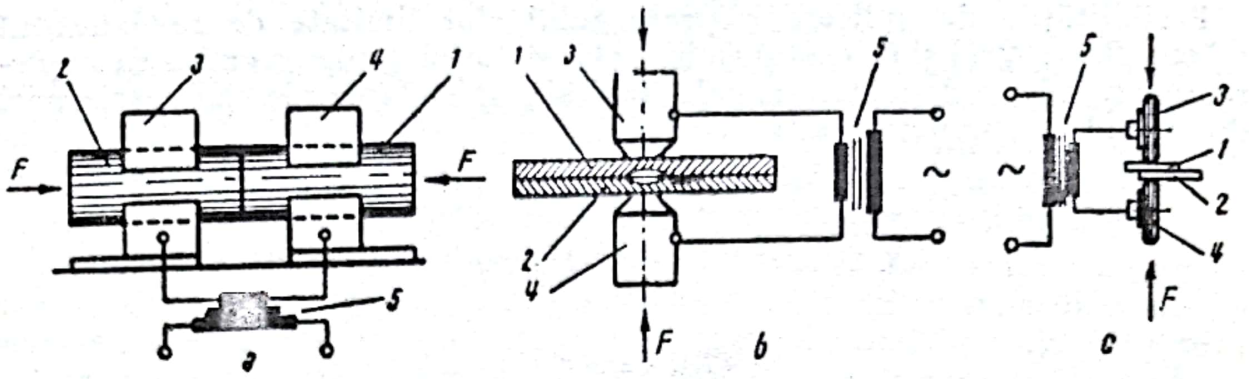


Fig. 4.41. Schemele de principiu ale sudării prin presiune:
a — cap la cap; *b* — prin puncte; *c* — în linie.

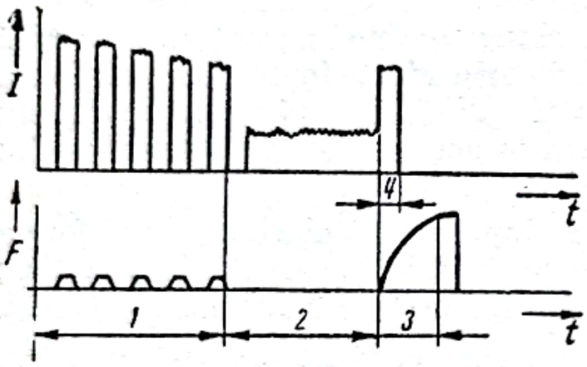


Fig. 4.42. Diagrama schematică a procesului de sudare prin topire intermediară cu preîncălzire:
I — valoarea efectivă a curentului de sudare; *F* — forța transmisă între capetele pieselor de sudat; *t* — timpul; *1* — durata preîncălzirii; *2* — durata topirii; *3* — durata refulării; *4* — durata refulării sub curent.

În cele ce urmează sînt descrise procedeele de sudare electrică prin presiune care utilizează curentul alternativ de frecvență industrială.

1) Sudarea cap la cap. În procedeul de sudare cap la cap, suprafețele frontale ale pieselor de sudat *1*, *2* (de obicei de formă prismatică) fixate în dispozitivele de strîngere *3*, *4*, sînt aduse în contact prin întreaga lor secțiune (fig. 4.41, *a*), cu o forță axială F_1. Prin conectarea curentului electric furnizat de secundarul transformatorului de sudare *5*, piesele se încălzesc pînă la temperatura dorită, după care se aplică forța $F_2 > F_1$, numită forță de refulare.

Procedeul are două variante: *sudarea în stare solidă* (prin rezistență), la care temperatura de încălzire a pieselor se află în domeniul deformărilor plastice și *sudarea prin topire intermediară*, îmbinarea realizîndu-se la temperatura de topire a metalului cu sau fără preîncălzirea capetelor pieselor.

În figura 4.42 este redată diagrama schematică a procesului de sudare prin topire intermediară cu preîncălzire. Preîncălzirea care precede topirea metalului se execută prin aducerea în contact cu o forță relativ scăzută și desfacerea repetată a contactului între capetele pieselor de sudat.

2) Sudarea prin puncte. La acest procedeu, sudarea se produce între fețele a două piese *1*, *2* (fig. 4.41, *b*) strînse între electrozii de contact *3*, *4* conectați la secundarul transformatorului de sudare *5*.

După strîngerea prealabilă a pieselor, se conectează transformatorul pentru o durată determinată de timp (de ordinul milisecundelor sau secundelor), în care curentul de sudare dirijat perpendicular străbate ambele plăci de sudat. Încălzirea maximă se obține în zona de trecere dintre cele

Fig. 4.43. Forme uzuale ale proeminenţelor la sudarea prin relief.

două piese, cuprinsă între vîrfurile electrozilor astfel încît se formează un nucleu de metal topit. Prin întreruperea sau micşorarea curentului şi menţinerea forţei de apăsare F se realizează solidificarea metalului topit, obţinîndu-se un punct sudat.

3) Sudarea în linie. Cusătura sudată este rezultatul formării unui şir de puncte sudate, care parţial se suprapun. Curentul electric este transmis pieselor *1*, *2* (fig. 4.41, *c*) prin intermediul unor role de contact *3*, *4* care se rotesc continuu cu o turaţie constantă, sau discontinuu.

Sudarea în linie se realizează în următoarele variante principale:

— sudarea prin rotire continuă cu turaţie constantă a rolelor de contact şi menţinerea constantă a curentului de sudare şi a forţei de apăsare;

— sudarea prin rotire continuă cu turaţie constantă a rolelor de contact şi curent modulat, astfel ca amplitudinea lui să varieze după o lege dată;

— sudarea prin rotire continuă cu turaţie constantă a rolelor de contact şi impuls de curent;

— sudarea cu mişcare intermitentă, în paşi, la care în timpul mişcării rolelor nu trece curentul electric, iar cînd rolele se opresc se execută un punct de sudură.

4) Sudarea prin relief. Procedeul de sudare prin relief este asemănător sudării prin puncte, una dintre piesele de sudat avînd anumite proeminenţe, cealaltă piesă fiind plană; punctele de sudură se realizează între proeminenţe şi piesa plană.

În figura 4.43 sînt reprezentate cîteva forme uzuale ale proeminenţelor.

Avantajele acestui procedeu sînt: productivitate mare, concentrare mai mare a căldurii în punctele de sudură şi uzură mai mică a electrozilor.

4.7.2. Utilaje pentru sudarea electrică prin presiune

Utilajele pentru sudarea electrică prin presiune se compun din:

— sursele de alimentare cu energie electrică — transformatoare monofazate de frecvenţă industrială;

— instalaţiile şi dispozitivele pentru menţinerea, fixarea şi realizarea forţelor de apăsare asupra pieselor de sudat;

— aparatajul de comandă a procesului de sudare (întreruptoare şi modulatoare).

Parametri de funcţionare. În calcularea diferitelor subansamble ale maşinilor de sudat prin presiune trebuie să se ia în considerare parametrii de funcţionare:

Scanned with OKEN Scanner

1) Durata relativă de funcţionare DA a maşinii încărcată cu sarcină electrică repetată de scurtă durată, depinzînd de procedeul de sudare, este

$$DA = \frac{t_s}{t_c} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$t_c = t_s + t_p ,$$

în care t_s este timpul de sudare (de trecere a curentului), t_p — timpul de pauză şi t_c — timpul total al ciclului de sudare.

2) Densitatea curentului de sudare J_s (de încălzire, de preîncălzire, de topire) este direct proporţională cu conductibilitatea electrică şi termică a materialului pieselor de sudat şi cu dimensiunile acestora, şi invers proporţională cu durata prescrisă a operaţiei de sudare.

3) Presiunea de lucru (de strîngere, de refulare) P se alege în funcţie de rezistenţa mecanică la cald a materialului pieselor de sudat şi de configuraţia cîmpului termic.

4) Puterea electrică specifică S_{sp} este o noţiune introdusă pentru a se putea alege maşinile de sudare în funcţie de dimensiunile pieselor care se sudează ; este puterea electrică aparentă necesară pentru sudarea unei secţiuni de 1 mm² şi depinde de natura materialului şi forma pieselor care se sudează, de mărimea secţiunii lor, de condiţiile de productivitate impuse şi de construcţia maşinii de sudare.

În tabela 4.5 sînt indicate valorile orientative ale acestor parametri, pentru sudarea pieselor de oţel.

5) Randamentul electric η depinde de procedeul de sudare, natura metalului de sudat, tipul constructiv al maşinii, realizarea şi întreţinerea îngrijită a circuitului de sudare etc. Valorile uzuale sînt mici, nedepăşind 40... 45%.

Tabela 4.5

Parametri de funcţionare ai maşinilor de sudat prin presiune, pentru piese de oţel (valori orientative)

a. Cap la cap

Procedeul de sudare	Durata relativă de funcţionare DA [%]	Timpul de sudare t_s [s]	Densitatea de curent J_s [A/mm²]	Presiunea de lucru P [kgf/mm²]	Puterea electrică specifică S_{sp} [kVA/mm²]
în stare solidă	10...30	0,15...15	40...200	1,5... 5	0,12...0,15
prin topire intermediară fără preîncălzire			50... 10	8...25	0,4 ...0,15
prin topire intermediară cu preîncălzire			40... 2	4...14	0,2...0,05

b. Prin puncte, în linie, prin relief

Procedeul de sudare	Durata relativă de funcționare DA [%]	Timpul de sudare t_s [s]	Curentul de sudare I_s [kA]	Forța de lucru F [kgf]
Prin puncte	5...20	0,08...0,44	5...20	100...800
În linie	10...50	0,04...0,18	10...22,5	220...1000
Prin relief	5...20	0,06...0,48	5,5...15,3	88...750

6) Factorul de putere cos φ depinde de construcția și dimensiunile circuitului de sudare, condițiile de sudare, dimensiunile și configurația pieselor de sudat și materialele magnetice din circuitul secundar al mașinii, avînd valori mici 0,3...0,6.

Transformatoare. Puterile transformatoarelor mașinilor de sudat prin presiune sînt cuprinse între 1 și 600 kVA, la tensiunea secundară de mers în gol de 1...25 V; tensiunea primară este de obicei 220/380 V. Secundarul se construiește dintr-o singură spiră (la mașini staționare) sau maximum două (la mașini suspendate), ale cărei capete sînt legate la electrozii de contact ai mașinii.

Datele de bază pentru alegerea transformatoarelor sînt:

— curentul de sudare (din secundar) — se determină cunoscînd proprietățile fizice ale metalului de sudat și rezistența electrică în locul de contact;

— tensiunea secundară de mers în gol — se determină cu ajutorul curentului de sudare și a impedanței totale a circuitului de sudare;

— durata relativă de funcționare DA;

— tensiunea rețelei de alimentare.

Variația tensiunii secundare a transformatorului se realizează în mai multe moduri:

— Prin modificarea numărului de spire din primar cu ajutorul prizelor intermediare (fig. 4.44, *a*); limitele de reglare sînt $E_{2max}/E_{2min} \simeq 2$, numărul treptelor de reglare luîndu-se de la 4 pînă la 12.

— Prin modificarea numărului de spire din primar, cu folosirea întregii înfășurări, toate spirele rămînînd în circuit la orice poziție de comutare (fig. 4.44, *b*); secțiunile comutabile ale înfășurării a_1 și a_2, b_1 și b_2, c_1 și c_2, se conectează în serie, pentru puterea minimă, pe prima treaptă, sau în paralel, pentru puterea maximă, pe ultima treaptă.

— Prin modificarea tensiunii de alimentare a transformatorului de sudare de la un autotransformator special AT (fig. 4.44, *c*); se aplică mașinilor cu o putere mai mare de 300 kVA.

Întreruptoare și modulatoare. La sudarea electrică prin presiune se cere de multe ori un reglaj precis al timpului de sudare și a energiei consumate pentru fiecare sudură. Aceasta necesită o determinare exactă a momentelor

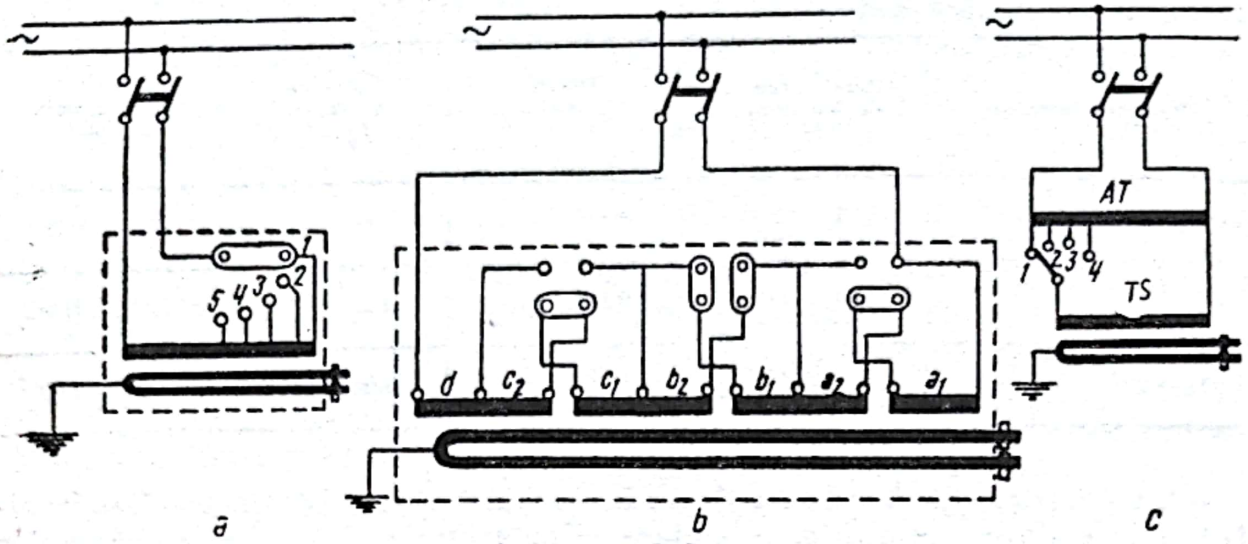


Fig. 4.44. Reglarea regimului de sudare prin presiune prin variaţia tensiunii transformatorului : *a* — cu prize intermediare ; *b* — cu secţiuni comutabile ; *c* — cu autotransformator.

de conectare şi deconectare a tensiunii de alimentare, respectiv a timpului de trecere a curentului prin piesele de sudat, precum şi variaţia în limite fine a valorii eficace a curentului, deci a încălzirii pieselor.

Schemele speciale utilizate pentru conectarea şi deconectarea maşinilor de sudare prin presiune conţin contactoare electromagnetice sau întreruptoare ionice.

Întreruptoarele ionice (cu ignitroane, tiratroane etc), spre deosebire de cele electromagnetice, datorită lipsei părţilor mecanice în mişcare, asigură o funcţionare fără inerţie şi fără zgomot, cu conectarea strictă a curentului în momentul trecerii acestuia prin valoarea zero.

Întreruptoarele cu ignitroane (fig. 4.45) sînt compuse din două ignitroane I_{g1} şi I_{g2} conectate în paralel — cruciş şi în serie cu transformatorul T al maşinii de sudat prin presiune. Aprinderea se face printr-un electrod de aprindere, prin redresoarele R_{d1} şi R_{d2}, în momentul în care contactul releului de timp RT_p (în general electronic) este închis. Curentul de aprindere cauzat de tensiunea la bornele ignitroanelor are aceeaşi frecvenţă ca şi curentul anodic. Datorită curentului redresat, fiecare ignitron va fi aprins pentru o jumătate de perioadă, şi anume în aceea în care tensiunea aplicată anodului este pozitivă, deoarece în circuitul fiecărui electrod de aprindere trece numai semiperioada pozitivă, cum arată săgeţile din figura 4.45.

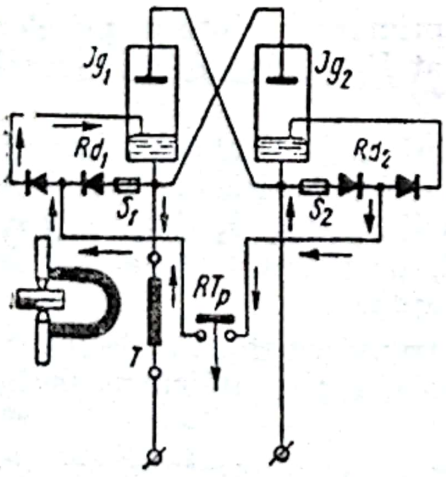


Fig. 4.45. Schema de principiu a întreruptorului cu ignitroane.

Prin deplasarea momentelor de aprindere ale ignitroanelor cu ajutorul releului RT_p,

se poate regla timpul de trecere a curentului şi valoarea medie a acestuia.

Siguranţele S_1 şi S_2 reprezintă o măsură de protecţie pentru cazul în care circuitul secundar al transformatorului de sudare nu este închis şi electrozii de aprindere sînt solicitaţi la întreaga tensiune a reţelei pe durata semiperioadei.

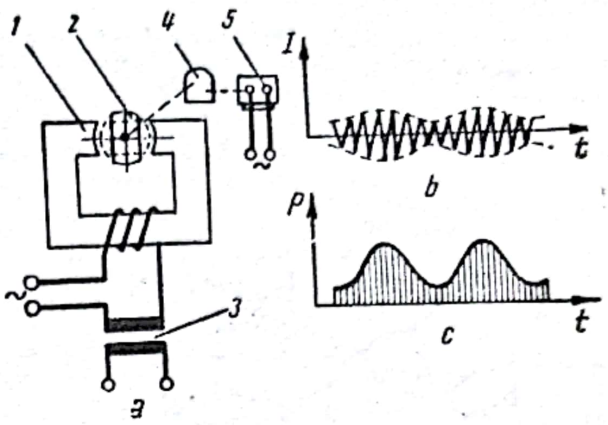


Fig. 4.46. Modulator pentru sudarea în linie: *a* — schema de principiu; *b* — modularea curentului; *c* — curba de variaţie a puterii.

La sudarea în linie, impulsurile de curent de scurtă durată sînt urmate de pauze şi, pentru a se asigura un regim stabil de sudare, este foarte importantă asigurarea unei conectări sincrone. Tehnica modernă foloseşte aproape exclusiv pentru acest scop întreruptoare sincrone cu ignitroane la care în locul releului RT_p se introduce un comutator rotativ antrenat de un motor sincron. Rezultate bune se obţin deasemenea cu ajutorul modulatoarelor, care în locul întreruperii curentului realizează variaţii mari ale acestuia în timpul procesului de sudare. Un modulator simplu este prezentat în figura 4.46.

Modulatorul constă dintr-o bobină cu circuit feromagnetic *1* (fig. 4.46, *a*), care are un şunt magnetic rotativ *2*. Bobina se intercalează în circuitul primar al transformatorului de sudare *3*. Şuntul magnetic este antrenat de un motor sincron *5*, prin cutia de viteze *4*. Reluctanţa bobinei se modifică în funcţie de poziţia şuntului: dacă întrefierul este mare, reluctanţa este mare; dacă întrefierul este mic (poziţia punctată a şuntului) reluctanţa scade. În primul caz, inductanţa bobinei este mică şi curentul în circuitul de sudare este mare; în al doilea caz, inductanţa este mare şi curentul de sudare ajunge la valoarea minimă. Ciclul de variaţie a curentului şi puterii (fig. 4.46, *b* şi *c*) este determinat de turaţia şuntului, care se reglează cu ajutorul cutiei de viteze.

4.8. SUDAREA ÎN ÎNALTĂ FRECVENŢĂ

Procedeul de sudare prin presiune în înaltă frecvenţă utilizează încălzirea prin curenţi de înaltă frecvenţă; transmiterea energiei electrice de la sursa de alimentare la piesele de sudat are loc prin contact sau prin inducţie.

Procedeul îşi găseşte aplicaţie în fabricarea conductelor (ţevilor) prin cusătură longitudinală sau spiralată, la sudarea cap la cap a conductelor sau barelor, la fabricarea conductoarelor sau plăcuţelor bimetalice, etc.

Sudarea în înaltă frecvenţă prin contact. În instalaţiile de sudare prin contact (fig. 4.47), banda de oţel trece printr-un laminor de formare unde

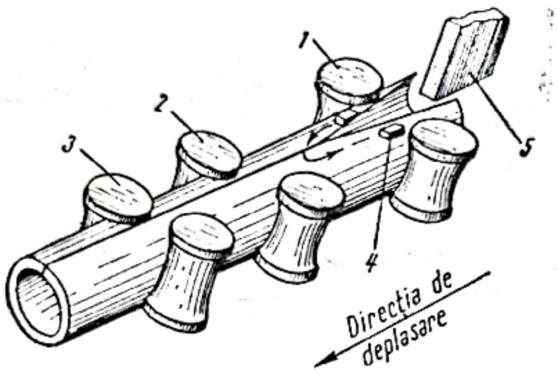


Fig. 4.47. Schema de principiu a sudării în înaltă frecvență prin contact.

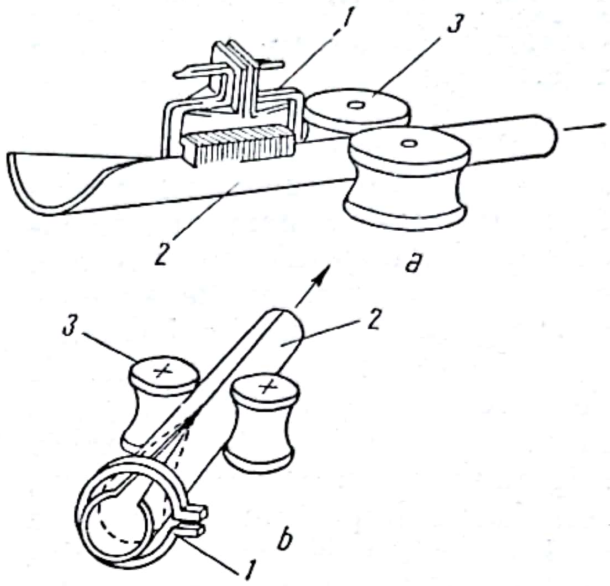


Fig. 4.48. Schema de principiu a sudării în înaltă frecvență prin inducție:
a — cu inductor liniar; *b* — cu inductor inelar; *1* — inductor; *2* — bandă de oțel; *3* — role de strîngere.

se îndoaie în formă circulară trecînd între rolele de strîngere *1*, *2* și *3*. Încălzirea rosturilor de sudare se face prin contactele glisante *4*, montate înaintea rolelor de strîngere *2* și *3*. Liniaritatea sudurii este păstrată cu ajutorul cuțitului director *5*.

Pentru ca cea mai mare parte a curentului electric să treacă prin rosturile de sudare, în interiorul conductei se plasează un miez magnetic, mărind astfel inductanța circuitului supus încălzirii.

Curenții de lucru au frecvența de 100...500 kHz și intensitatea de 1 000... 3 000 A, tensiunea pe contacte fiind de 50...200 V.

Sudarea în înaltă frecvență prin inducție. Spre deosebire de instalațiile de sudare prin contact, în acest caz, încălzirea rosturilor de sudare se face inductiv, cu ajutorul unui inductor liniar (fig. 4.48, *a*) sau inelar (fig. 4.48, *b*).

Inductorul liniar are lungimea de maximum 500 mm. Frecvența de lucru este de 2 500...8 000 Hz, la o tensiune de 100...200 V.

Pentru ca instalația să lucreze cu un randament bun la un timp de încălzire minim, se recomandă ca frecvența de lucru să se aleagă astfel încît

$$a = (0{,}3...0{,}6)\,\delta \qquad (4.32)$$

în care a este grosimea peretelui conductei, iar δ — adîncimea de pătrundere a curentului în oțel încălzit la o temperatură ce depășește punctul Curie.

Inductorul inelar poate fi executat cu una sau mai multe spire. Curenții de încălzire induși în conductă se concentrează la marginile fantei țevii (rosturile de sudare), înconjurînd fanta și închizîndu-se apoi prin corpul conductei (linia întreruptă în fig. 4.48, *b*). Plecînd de la muchiile margi-

nilor fantei, încălzirea se produce treptat în întreaga grosime a peretelui, într-o zonă foarte îngustă absolut simetrică față de suprafața de sudat. Pentru a apropia cît mai mult curenții de margini se utilizează și la acest procedeu un miez magnetic montat în interiorul conductei.

Tabela 4.6

Frecvența și timpul de încălzire optime pentru sudarea cap la cap a conductelor, cu încălzire inductivă

Diametrul conductei [mm]	Grosimea peretelui [mm]	Frecvența [Hz]	Timpul de încălzire [s]
10... 16	1... 2	70000	2
16... 42	2... 4	8000	2... 5
42...100	4... 6	2500	4...10
100...200	6...10	1000	8...15

Frecvența optimă se alege în funcție de: puterea minimă a instalației, condițiile optime pentru obținerea unor îmbinări de calitate, posibilitatea de ecranare a instalației de sudare, etc; în lipsa unor date precise de calcul se poate lua în considerare frecvența de 440 kHz.

Încălzirea inductivă cu inductor inelar se utilizează și pentru sudarea cap la cap a conductelor. La trecerea curentului de înaltă frecvență prin inductorul montat peste capetele conductelor supuse îmbinării, acestea se încălzesc și apoi prin strîngere, se sudează.

Încălzirea decurge în condiții bune dacă

$$a = (0{,}3 \ldots 1)\,\delta, \tag{4.33}$$

în care a și δ au aceleași semnificații ca și în relația (4.32).

Valorile optime ale frecvenței și timpului de încălzire în funcție de diametrul și grosimea peretelui conductei sînt indicate în tabela 4.6.

Puterea generatoarelor de înaltă frecvență în cazul încălzirii inductive este mai mare decît în cazul încălzirii prin contact.

4.9. SUDAREA CU ENERGIE ÎNMAGAZINATĂ

Sudarea cu energie înmagazinată este un procedeu de sudare electrică prin presiune, la care energia necesară este înmagazinată într-un acumulator de energie (condensator, volant, acumulator electric) fiind apoi cedată circuitului de sudare sub formă de impulsuri.

Acest procedeu se aplică în practică acolo unde regimul de sudare este foarte dur (se cer puteri de sute de kilowați pentru un timp ce nu depășește o sutime de secundă), iar energia consumată la sudarea fiecărui punct trebuie să fie precis determinată și independentă de condițiile exterioare (cum ar fi variațiile tensiunii de alimentare). Un avantaj de seamă îl constituie faptul că acumularea energiei se face într-un timp relativ mare, cu o putere mică, cedarea energiei făcîndu-se însă rapid, cu putere mare. Se utilizează în sudarea pieselor foarte fine, a pieselor din aliaje pretențioase, a aliajelor ușoare, etc. Înmagazinarea energiei poate avea loc în cîmp electric sau magnetic.

Scanned with OKEN Scanner

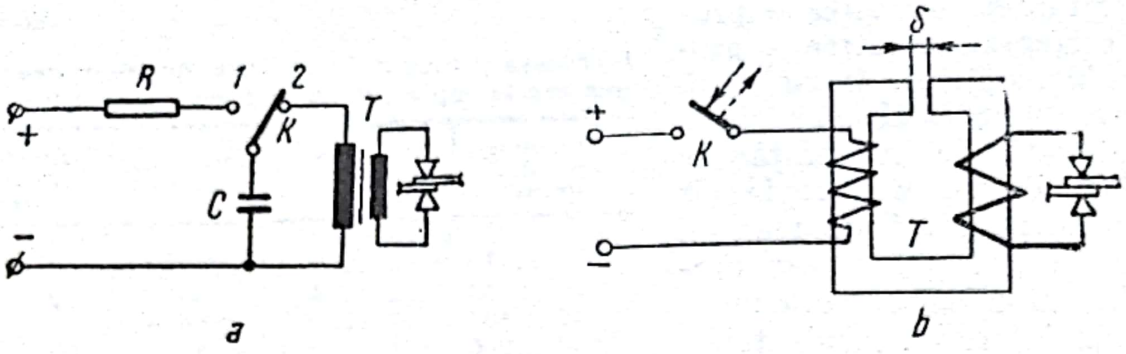


Fig. 4.49. Schemele de principiu ale sudării cu energie înmagazinată:
a — în cîmp electric; *b* — în cîmp magnetic.

Sudarea cu energie înmagazinată în cîmp electric. Principiul de funcţionare al unei instalaţii de sudare cu energie înmagazinată în cîmp electric se bazează pe descărcarea unor condensatoare în circuitul primar al transformatorului de sudare (fig. 4.49, *a*). La închiderea comutatorului *K* pe poziţia *1*, condensatorul *C* se încarcă de la sursă prin rezistorul *R*, pînă cînd tensiunea la bornele condensatorului devine aproximativ egală cu tensiunea sursei. La trecerea pe poziţia *2*, condensatorul se descarcă pe înfăşurarea primară a transformatorului *T*, transmiţînd energia electrică înmagazinată, circuitului de sudare.

Cantitatea de energie acumulată de condensatoare este determinată de tensiunea maximă şi de capacitatea bateriei de condensatoare (rel. 6.1).

Pentru maşinile de puteri mici 80...100 W, tensiunea de încărcare este 600...1 000 V, iar pentru puteri mijlocii şi mari, 1 000...6 000 V; capacitatea bateriei de condensatoare este de 2 000...3 000 μF.

Forma şi durata impulsului de curent se reglează prin:

— modificarea capacităţii bateriei de condensatoare; crescînd capacitatea, creşte curentul maximal şi durata impulsului;

— modificarea raportului de transformare al transformatorului; micşorarea acestuia conduce la mărirea curentului maximal şi reducerea duratei impulsului;

— modificarea tensiunii de încărcare; curentul maximal creşte cu tensiunea, durata impulsului rămînînd constantă.

Sudarea cu energie înmagazinată în cîmp magnetic. În figura 4.49, *b* este arătată schema electrică de principiu a acestui procedeu de sudare. Înfăşurarea primară a transformatorului de sudare *T* este conectată la o sursă de curent continuu, prin închiderea întreruptorului *K*. Curentul prin circuit începe să crească spre o valoare limită impusă de tensiunea aplicată şi rezistenţele din circuit. Variaţia curentului atrage după sine apariţia unui flux în circuitul feromagnetic prevăzut cu un întrefier δ al transformatorului, care înmagazinează o cantitate maximă de energie magnetică

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2}, \qquad (4.34)$$

în care L este inductivitatea înfăşurării primare parcurse de curentul maxim I_m. La deschiderea întreruptorului K (comandat automat de un releu de curent sau un dispozitiv electronic special) în înfăşurarea primară apare o supratensiune, respectiv un vîrf de curent în circuitul de sudare. Mărimea curentului de vîrf se poate regla prin modificarea momentului de deschidere a circuitului primar sau a vitezei de decuplare a întreruptorului.

Cantitatea de energie acumulată în miezul magnetic al transformatorului prevăzut cu întrefier poate ajunge la 12...15 Ws pentru un kilogram — greutate a miezului magnetic.

4.10. SUDAREA CU ULTRASUNETE

Procedeul de sudare cu ultrasunete aparţine sudării prin presiune, energia necesară sudării obţinîndu-se prin aplicarea locală de ultrasunete.

Instalaţia de sudare cu ultrasunete poate executa sudarea prin puncte (fig. 4.50) sau în linie. Instalaţia se compune din generatorul de înaltă frecvenţă G, avînd puterea şi frecvenţa reglabile continuu (frecvenţa pînă la circa 30 kHz) blocul acustic BA prevăzut cu scula de sudare (sonotrodul) S şi mecanismul de presiune P.

Transformarea energiei electromagnetice în ultrasunete are loc prin magnetostricţiunea unei bare din titanat de bariu care formează vibratorul V. Deoarece oscilaţiile mecanice obţinute au o amplitudine redusă, ele sînt amplificate de amplificatorul mecanic A (de formă cilindrică, conică, exponenţială sau în trepte), executat din oţel, şi transmise apoi sonotrodului. Lungimea ansamblului vibrator — amplificator trebuie să fie egală cu un număr întreg de semiunde al undei ultracustice (fig. 4.51).

Vibraţiile ultrasonore sînt transmise pieselor prin cuiul (sau rola, în cazul sudării în linie) de contact al sonotrodului şi creează forţe de frecare între

Fig. 4.50. Schema instalaţiei de sudare prin puncte cu ultrasunete. ⟶

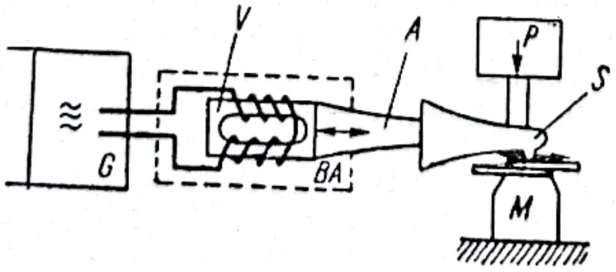
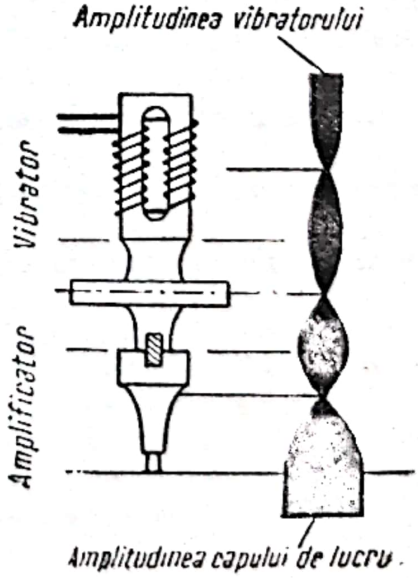


Fig. 4.51. Amplificarea vibraţiilor ultrasonore.



piesele ce se sudează, provocînd deformarea plastică a metalelor, datorită căruia fapt se produce sudarea. Dacă masa de lucru *M* pe care sînt montate piesele de sudat are pe suprafaţa de lucru un strat de carbură de wolfram, se obţine o oglindă de reflectare a ultrasunetelor care contribuie la mărirea randamentului instalaţiei.

Parametrii care caracterizează instalaţia de sudare cu ultrasunete sînt: presiunea de lucru, puterea şi frecvenţa de alimentare, timpul de sudare.

La o presiune cuprinsă între 1...200 kg pentru piese de 5 μm...5 mm grosime, timpul de lucru este cuprins între zecimi de secundă şi cîteva secunde; amplitudinea capului de lucru are valori de la minimum 5...10μm pînă la maximum 50...100μm.

Procedeul de sudare cu ultrasunete fiind costisitor, se aplică acelor materiale care nu pot fi sudate prin alt procedeu: elementele foarte subţiri din aluminiu eloxat sau metale lăcuite, în tehnica electronică, nucleară şi spaţială.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 5

ELECTROCHIMIE ȘI ELECTROMETALURGIE

5.1. PROBLEME GENERALE

Concepţiile moderne asupra structurii materiei dezvăluie procesele electrice care însoţesc în mod obişnuit orice reacţie chimică. În unele cazuri, schimburile dintre substanţele chimice în reacţie pot să aibă un caracter electric majoritar, reacţia chimică fiind folosită ca sursă de energie electrică, în timp ce în alte situaţii, energia necesară desfăşurării unor reacţii chimice este furnizată de o sursă externă de energie electrică.

Electrochimia studiază fenomenele de transformare mutuală între energia chimică şi energia electrică, care se produc în electroliţi (substanţe disociate) sau la limita dintre electroliţi şi conductoare electronice (metalice), cînd acestea sînt parcurse de un curent electric.

Schimburile dintre energia chimică şi energia electrică se desfăşoară în următoarele moduri principale :

— transformarea energiei chimice în energie electrică, în pilele sau elementele galvanice ;

— transformarea energiei electrice în energie chimică în electrolizoare, curentul electric străbătînd un electrolit ;

— transformarea în ambele sensuri a energiei electrice în energie chimică, în acumulatoare, ale căror substanţe active eliberează energia electrică în urma reacţiilor chimice dintre ele ; prin trecerea unui curent electric furnizat de o sursă exterioară, substanţele active sînt readuse la starea lor iniţială.

Clasificarea celor mai importante tehnologii electrochimice oferă o privire de ansamblu asupra posibilităţilor de aplicare practică a fenomenelor electrochimice :

a) Electroliza soluţiilor apoase ale combinaţiilor metalice, cuprinzînd:
— extragerea electrolitică a metalelor;
— rafinarea electrolitică a metalelor;
— galvanotehnica.
b) Electroliza soluţiilor apoase ale combinaţiilor nemetalice:
— electroliza apei;
— electroliza clorurilor alcaline.
c) Electroliza sărurilor topite:
— extragerea electrolitică a metalelor;
— rafinarea electrolitică a metalelor.
d) Aplicaţiile tehnice ale fenomenelor electrocinetice: electroforeza, electroosmoza şi electrodializa.
e) Sursele chimice de curent: elemente galvanice şi acumulatoare.

5.1.1. Clasificarea conductoarelor

După natura purtătorilor de sarcină electrică, conductoarele se clasifică în conductoare electronice, conductoare ionice şi conductoare mixte. Efectele trecerii curentului electric prin cele trei categorii de conductoare sînt cu totul diferite unele de altele.

În categoria conductoarelor electronice intră metalele, aliajele, carbonul, unele sulfuri metalice (de Pb, Cd, Cu), carburile şi unii oxizi metalici. Trecerea curentului electric este legată de deplasarea electronilor liberi ai metalului şi nu produce nici un transport sau transformare de materie, ci numai transformarea energiei electrice în energie termică, conform legii Joule-Lenz.

Rezistenţa electrică a conductoarelor metalice creşte cu temperatura (rel. 3.23), coeficientul de variaţie a rezistivităţii cu temperatura fiind pozitiv.

Conductoarele ionice sau electroliţii cuprind acizii, bazele, toate sărurile metalice în stare solidă, topită sau în soluţie, precum şi un mare număr de săruri organice care pot da ioni în soluţie.

Prin electrolit se înţelege o substanţă disociată. În procesul de disociere, care poate fi prin dizolvare sau prin topire, moleculele se scindează în ioni negativi (cu surplus de electroni), sau ioni pozitivi (cu lipsă de electroni). Disociaţia este determinată de micşorarea forţei electrostatice dintre ioni într-un mediu dielectric cu mare permitivitate (la dizolvare), sau de mărirea agitaţiei termice (la topire).

Sub influenţa unui cîmp electric, ionii de sine stătători se deplasează spre cei doi poli (electrozi) de semn contrar; prin urmare, trecerea curentului prin electroliţi este legată de un transport de materie, care poate fi însoţit şi de transformări chimice.

Coeficientul de variaţie a rezistivităţii cu temperatura este negativ în cazul conductoarelor ionice, deci rezistenţa electroliţilor scade cu temperatura.

Scanned with OKEN Scanner

Conductoarele mixte sînt substanţe de tranziţie între cele două categorii de conductoare; conductibilitatea lor este parţial electronică şi parţial ionică.

5.1.2. Electroliza

Să considerăm un vas G (fig. 5.1), în care se găseşte soluţia unui electrolit şi doi electrozi metalici cufundaţi în această soluţie; dispozitivul este denumit *electrolizor* (celulă sau baie de electroliză). Cei doi electrozi, anodul — a şi catodul — c, sînt alimentaţi de la o sursă de curent continuu S, prin intermediul unei rezistenţe variabile R.

În conformitate cu teoria disociaţiei electrolitice, electroliţii în stare de soluţie sînt parţial ionizaţi, fenomen care are loc spontan. Aceasta este demonstrată de faptul că există conducţie ionică începînd de la diferenţe de potenţial foarte mici între electrozi.

Moleculele sărurilor se disociază în ioni pozitivi ai metalelor şi ioni negativi ai radicalilor acizi ($NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$; $ZnSO_4 \rightarrow Zn^{++} + SO_4^{--}$; $CuCl_2 \rightarrow Cu^{++} + 2\,Cl^-$).

Moleculele acizilor se disociază în ioni pozitivi de hidrogen şi ioni negativi ai radicalilor acizi ($H_2SO_4 \rightarrow 2\,H^+ + SO_4^{--}$; $HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$).

Moleculele bazelor se disociază în ioni pozitivi ai metalelor şi ioni negativi de hidroxil ($NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$).

Ionii din soluţie, supuşi acţiunii cîmpului electric care se stabileşte între electrozi, se deplasează spre electrozii de semn contrar (anionii — ionii negativi spre anod, cationii — ionii pozitivi spre catod). Trecerea curentului electric prin soluţie se datoreşte deci transportului sarcinilor electrice prin intermediul anionilor şi cationilor, aceştia formînd doi curenţi de sensuri contrare.

Sensul convenţional al curentului în celulele de electroliză este de la anod spre catod, adică sensul de deplasare al cationilor.

Dacă anumite condiţii sînt îndeplinite, ionii ajunşi la electrozi se descarcă (anionii pierd electroni, iar cationii captează electroni) şi participă la reacţii a căror totalitate formează procesul electrolizei. Prin neutralizarea ionilor, aceştia sînt puşi în libertate ca atomi sau molecule.

Electroliza este deci procesul de descompunere permanentă a unui electrolit sub acţiunea curentului electric. Descompunerea apare la contactul electrozilor cu soluţia, adică acolo unde se trece de la conducţia electronică la cea ionică şi invers.

Sarcinile ionilor neutralizează electrozii, micşorînd potenţialul acestora şi deci di-

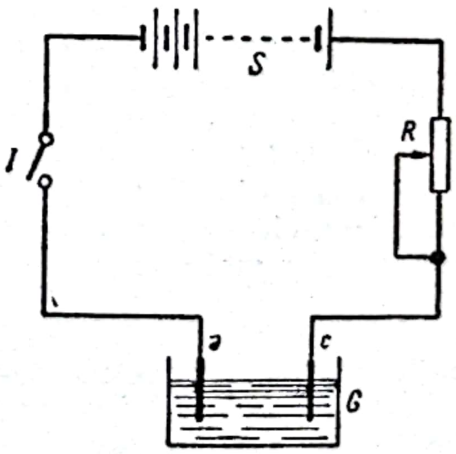


Fig. 5.1. Dispozitiv de electroliză.

Scanned with OKEN Scanner

ferenţa de potenţial (tensiunea) dintre electrozi; pentru a menţine tensiunea constantă, electrozii trebuie alimentaţi în permanenţă de sursa exterioară de curent. Există astfel o legătură directă între curentul electric consumat şi cantitatea de electrolit descompus prin electroliză.

Paralel cu procesul de descompunere a electrolitului, se desfăşoară o serie de reacţii între produsele de electroliză, electrolit, solvent şi electrozi, denumite *reacţii secundare*, dintre care se menţionează:

— Dizolvarea anozilor în timpul electrolizei, dacă se folosesc anozi metalici din cupru, zinc, fier, nichel, cadmiu etc. Prin dizolvare, ionii metalului trec în soluţie, electronii lor fiind cedaţi electrodului. Dizolvarea anozilor stă la baza rafinării şi uneori a extragerii metalelor.

— Formarea moleculelor de gaze biatomice ($2H \rightarrow H_2$, $2Cl \rightarrow Cl_2$, $2O \rightarrow O_2$ etc), fenomen utilizat la electroliza apei şi a clorurilor alcaline.

La electroliza soluţiilor şi a topiturilor pot apărea numeroase alte genuri de reacţii secundare; de multe ori, electroliza este astfel condusă, încît apariţia reacţiilor secundare să fie favorizată.

Polarizare şi depolarizare. Trecerea curentului electric prin electrolizor modifică condiţiile de echilibru ale electrozilor, aceştia devenind electrozi polarizaţi.

Complexul de fenomene care face ca în timpul funcţionării unei băi de electroliză să apară modificări la electrod sau în soluţia din imediata apropiere a electrozilor, se numeşte polarizare; aceasta este întotdeauna însoţită de apariţia unei tensiuni contraelectromotoare.

După natura fenomenelor care conduc la polarizarea electrozilor, se deosebesc: — polarizarea electrochimică şi — polarizarea de concentraţie.

Polarizarea electrochimică este datorată formării de substanţe, care modifică potenţialul electrodului, cum este cazul polarizării prin gaze (în special hidrogen), fenomen întîlnit atît în celulele de electroliză cît şi în pilele reversibile; tensiunea contraelectromotoare datorată acestei polarizări are valori între 0,2 şi 0,8 V, chiar la densităţi mici de curent. Ca o consecinţă, viteza proceselor la electrozi, se micşorează la descărcarea catodică a anumitor ioni metalici sau la dizolvarea anodică a metalelor respective.

Substanţele depolarizante, acţionînd cu gazele care se descarcă la electrozi, evită o eventuală polarizare a acestora. De exemplu, la electroliza aluminei topite, la anod se degajează oxigen, care atacă anodul de cărbune, cu formare de CO_2; se spune că oxigenul a funcţionat ca depolarizant anodic.

Ionii aflaţi în electrolit sînt supuşi, din partea electrozilor de semn opus, unor forţe electrostatice de atracţie. De aceea, electrolitul va avea o concentraţie ionică mai mare în apropierea electrozilor decît în restul băii; aceasta atrage după sine un proces de difuziune liberă a ionilor din zona de concentraţie mărită în cea de concentraţie scăzută. Echilibrul produs între forţele electrostatice dintre electrozi-ioni şi difuziunea liberă a ionilor, conduce la scăderea potenţialului catodului şi mărirea potenţialului anodului — fenomen denumit polarizare de concentraţie; această polarizare atinge valori ridicate la electroliza sărurilor. Pentru reducerea polarizării de concentraţie

se măreşte viteza de difuziune a ionilor prin agitare, încălzire, mărirea concentraţiei electrolitului etc.

Legea lui Faraday exprimă legătura care există între cantitatea de electricitate, care traversează soluţia unui electrolit, şi cantitatea de electrolit descompus: cantitatea g de substanţă depusă la electrod este proporţională cu cantitatea de electricitate Q, care traversează soluţia electrolitului:

$$g = \frac{\varepsilon}{F} Q \quad [\text{grame}], \tag{5.1}$$

în care F este *constanta lui Faraday* (reprezentînd cantitatea de electricitate necesară descompunerii unui echivalent — gram de electrolit) $F = 96\,500$ C $= 26{,}8$ Ah; ε — *echivalentul electrochimic al electrolitului* (reprezentînd cantitatea de electrolit descompus de unitatea de cantitate de electricitate — 1 C),

$$\varepsilon = \frac{A}{n} = \frac{\text{echivalentul-gram}}{\text{valenţă}} \quad [\text{grame}]. \tag{5.2}$$

În tabela 5.1 sînt daţi echivalenţii electrochimici ai cîtorva elemente.

Tabela 5.1

Echivalenţii electrochimici ai cîtorva elemente

Element	H	O	Cl	Al	Cu	Ni	Pb
ε, în mg	0,01045	0,0829	0,367	0,093	0,658	0,304	1,073

În realitate, cantităţile de substanţe separate prin electroliză sînt mai mici decît cele rezultate prin utilizarea relaţiei (5.1), datorită reacţiilor secundare care consumă o anumită cantitate de electricitate.

Intensitatea I a curentului necesar electrolizei se determină din legea conservării sarcinii electrice ($i = I = \text{const.}$, în cazul sursei de curent continuu)

$$Q = \int i\,dt = It, \tag{5.3}$$

în care Q se înlocuieşte cu valoarea din relaţia (5.1); rezultă

$$I = \frac{Fg}{\varepsilon t} \quad [\text{A}]. \tag{5.4}$$

Adesea este util să se determine durata electrolizei, cunoscînd valoarea curentului debitat de sursa de alimentare.

$$t = \frac{Fg}{\varepsilon I} \quad [\text{s}]. \tag{5.5}$$

Scanned with OKEN Scanner

Valorile curenţilor necesari în instalaţiile de galvanostegie sînt de ordinul zecilor şi sutelor de amperi, iar în industria electrochimică de ordinul miilor de amperi.

Tensiunea la bornele celulei de electroliză. Pentru obţinerea separării continue a electrolitului este necesar ca la bornele celulei de electroliză să existe o tensiune cel puţin egală cu

$$U = U_t + U_e + U_c, \tag{5.6}$$

unde: U_t este tensiunea de descompunere a electrolitului (tensiunea minimă la care apar fenomene continue şi vizibile de electroliză), depinzînd de natura electrolitului şi a electrozilor;

U_e — căderea de tensiune în electrolit;

U_c — căderea de tensiune în electrozi, bare, contacte.

Căderea de tensiune în electrolit se determină cu relaţia:

$$U_e = IR_e = \frac{1}{\gamma}\frac{l}{A}I = \frac{1}{\gamma}lJ_{med} \quad [\mathrm{V}], \tag{5.7}$$

în care R_e este rezistenţa electrolitului (în Ω), γ — conductivitatea electrolitului (în $\Omega^{-1}\,m^{-1}$), l — distanţa dintre electrozi (în m), A — secţiunea electrolizorului (în m^2), J_{med} — densitatea medie de curent (în $A \cdot m^{-2}$).

Conductivitatea electroliţilor este mică în raport cu cea a metalelor; ea este influenţată de temperatura, concentraţia şi într-o măsură mai mică, de presiunea electrolitului. Conductivitatea electroliţilor creşte cu temperatura, iar în funcţie de concentraţie prezintă o variaţie specifică: pentru concentraţii slabe, conductivitatea creşte la început cu creşterea concentraţiei şi tinde spre o valoare maximă, pentru a scădea din nou dacă concentraţia continuă să crească.

În practică se iau o serie de măsuri pentru reducerea căderii de tensiune în electrolit şi anume:

— se măreşte conductivitatea electrolitului prin ridicarea temperaturii şi a concentraţiei lui;

— se reduce distanţa între electrozi;

— se reduce densitatea medie de curent, prin mărirea suprafeţei A.

Valorile uzuale ale tensiunii sînt: 2...12 V pentru băile de galvanostegie şi 2...200 V pentru cele utilizate în industria electrochimică.

Randamente electrochimice. Procesele electrochimice sînt caracterizate din punct de vedere al eficacităţii lor prin randamentul de curent şi randamentul energetic.

Randamentul de curent, reprezentînd acea fracţiune din cantitatea totală de curent care este folosită util într-un proces de descompunere electrolitică, se poate exprima în funcţie de:

a) curentul consumat, ca raport între cantitatea de electricitate teoretic necesară Q_t (conform legii lui Faraday) şi cantitatea de electricitate Q_r

folosită în mod real, pentru separarea prin electroliză a unei anumite cantități de substanță,

$$\eta_c = \frac{Q_t}{Q_r} \cdot 100 \quad [\%]; \tag{5.8}$$

b) Substanța depusă prin electroliză, ca raport între cantitatea de substanță m obținută în mod real și cantitatea de substanță g care ar trebui obținută teoretic (conform legii lui Faraday), pentru o anumită cantitate de electricitate,

$$\eta_c = \frac{m}{g} \cdot 100 \quad [\%]. \tag{5.9}$$

Randamentul energetic este raportul dintre cantitatea de energie electrică teoretic necesară W_t și cea real utilizată W_r, pentru separarea unei cantități determinate de substanță,

$$\eta = \frac{W_t}{W_r} \cdot 100 \quad [\%], \tag{5.10}$$

sau înlocuind energia electrică în funcție de tensiune și sarcina electrică

$$\eta = \frac{U_t \cdot Q_t}{U \cdot Q_r} \cdot 100 = \frac{U_t}{U} \cdot \eta_c \quad [\%]. \tag{5.11}$$

Randamentul energetic este direct proporțional cu randamentul de curent η_c și cu raportul dintre tensiunea U_t de descompunere a electrolitului și tensiunea U de la bornele celulei de electroliză, fiind deci întotdeauna mai redus decît randamentul de curent.

5.1.3. Elementele constructive ale electrolizoarelor

Părțile principale ale unui electrolizor sînt: vasul care conține electrolitul; electrozii; contactele electrozilor; șinele și barele de alimentare cu curent; diafragmele; instalațiile auxiliare.

Vasul care conține electrolitul, de formă paralelipipedică (fig. 5.2) sau cilindrică, se confecționează din materiale care rezistă la acțiunea corozivă a electroliților sau a produselor de electroliză. Dacă o oarecare coroziune este inevitabilă, produsele de coroziune nu trebuie să împiedice procesul de electroliză și să impurifice produsele de electroliză. Materialele utilizate sînt: oțelul, plumbul, materialele ceramice, sticla, grafitul, materialele plastice, lemnul, cauciucul și cimentul.

Oțelul cu conținut redus de carbon poate fi folosit cu rezultate bune în soluții alcaline sau în soluții puternic oxidante, care îl trec în stare pasivă. Aliajul de plumb cu stibiu este utilizat în special pentru căptușeala electrolizorului, în soluții de acizi oxidanți și acid sulfuric, pînă la temperatura de 55°C; plumbul prezintă avantajul că permite realizarea unor căptușeli fără discontinuități.

Scanned with OKEN Scanner

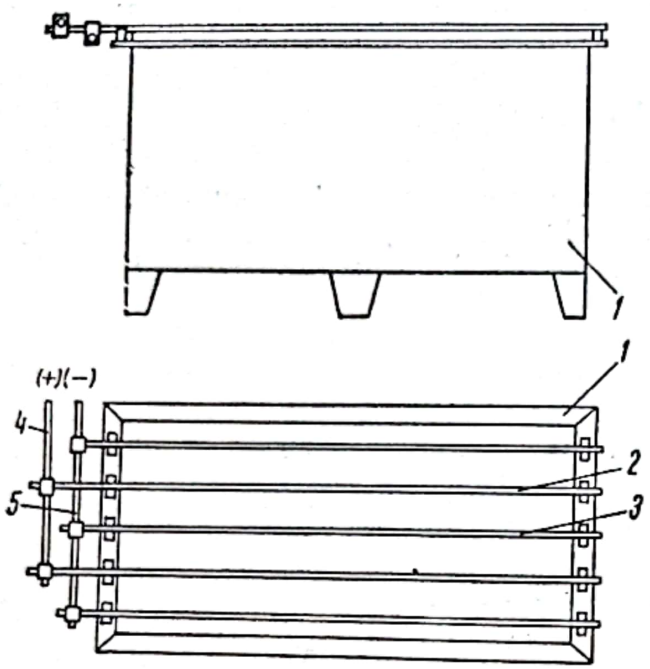


Fig. 5.2. Baie staționară de galvanizare:
1 — vasul cu electrolit; *2, 3* — șine de curent; *4, 5* — bare de alimentare de la sursă.

Materialele ceramice, ca porțelanul sau gresia artificială, sînt utilizate ca elemente de construcție sau de căptușire (sub formă de plăci) la vasele ce conțin soluții acide. Au dezavantajul de a fi foarte grele și puțin rezistente la șocuri mecanice sau la variații de temperatură. În plus, folosirea materialelor ceramice sub formă de plăci necesită utilizarea unor chituri antiacide de bună calitate.

Instalațiile moderne de electroliză utilizează tot mai mult masele plastice, atît ca elemente constructive, cît și pentru căptușire, în special în cazul soluțiilor acide; nu se folosesc pentru soluții alcaline sau detergenți fierbinți. Poliesterii armați cu fibre de sticlă se utilizează turnați, iar rășinile acrilice și policlorura de vinil — sub formă de plăci.

Sticla se folosește la construcția cuvelor de dimensiuni reduse; ea rezistă la acțiunea corozivă a electroliților foarte agresivi, cu excepția acidului fluorhidric; nu se folosește pentru soluții alcaline fierbinți. Lemnul (mai ales cel de pin) are o utilizare limitată, fiind folosit în special la cuvele de spălare intermediară cu apă (temperatură maximă 40°C), sau de neutralizare cu soluții slab acide sau alcaline (temperatură maximă 30°C). Cuvele din lemn nu se folosesc decît pentru un singur gen de soluție agresivă (acidă sau alcalină), întrucît lemnul absoarbe aceste soluții și nu poate fi perfect spălat. Cauciucul natural sau cel sintetic se utilizează pentru căptușire, sub formă de folii de 3...5 mm grosime.

Electrozii. După modul de legare a electrozilor la sursa de alimentare, se deosebesc: electrozi monopolari și electrozi bipolari.

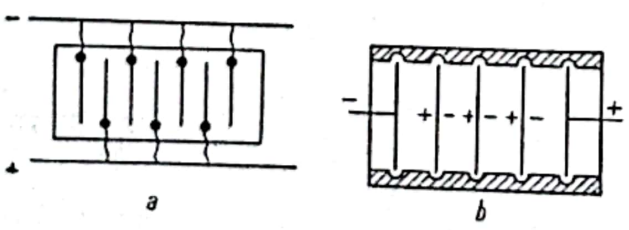


Fig. 5.3. Schema unui electrolizor cu electrozi monopolari (*a*) și bipolari (*b*).

Electrozii monopolari au o singură funcțiune și anume, de anod sau de catod. Toți electrozii monopolari de același semn, dintr-un electrolizor, sînt legați în paralel, ca în figura 5.3, *a*.

La electrozii bipolari, numai cei doi electrozi marginali sînt

legaţi direct la sursă ; toţi electrozii intermediari sînt legaţi în serie şi au o dublă funcţiune : pe una din feţe au funcţiunea de anod, iar pe cealaltă — de catod (fig. 5.3, *b*). Pentru a împiedica închiderea circuitului de electroliză direct între cei doi electrozi marginali, suprafaţa electrozilor trebuie să fie cît mai apropiată de suprafaţa secţiunii electrolizorului.

Electrozii destinaţi unei funcţionări permanente, de durată, trebuie să satisfacă următoarele condiţii : să fie rezistenţi faţă de acţiunea chimică a electrolitului şi produselor electrolizei ; să aibă o bună rezistenţă mecanică ; să aibă o bună conductivitate electrică ; să fie prelucrabili în diferite forme adecvate scopului ; să aibă un preţ de cost redus.

Materialele care îndeplinesc aceste condiţii sînt : metalele pure (oţelul, nichelul, aluminiul, plumbul, platina, titanul şi tantalul), aliajele, oxizii, cărbunele sau grafitul.

Oţelul inoxidabil este utilizat în soluţii alcaline, ca de exemplu cele folosite la degresarea şi lustruirea electrochimică, etc. Nichelul se întrebuinţează în aceleaşi scopuri ca şi oţelul, fiind mai rezistent la acţiunea soluţiilor foarte corozive. Aluminiul este utilizat drept material catodic în industria electrochimică. Plumbul este un excelent material de electrod (atît catod cît şi anod), dacă electrolitul este pe bază de acid sulfuric (de exemplu la decaparea electrochimică). Electrozii de cărbune şi mai ales cei de grafit sintetic sînt foarte mult utilizaţi în industria electrochimică, datorită proprietăţilor adecvate pe care le au ; prezintă un singur dezanvantaj şi anume sînt puternic atacaţi de oxigen.

În decursul electrolizei, în procesele electrometalurgice şi în galvanotehnică, anodul se dizolvă şi se depune la catod. Anodul este de fapt materia primă a procesului (zinc, cupru, cadmiu, nichel etc), iar catodul — produsul finit. În cazul electrozilor monopolari greutatea anozilor scade, iar cea a catozilor creşte continuu. Utilizînd electrozi bipolari, greutatea acestora nu se schimbă în mod practic în timpul electrolizei ; compoziţia lor suferă însă modificări. Astfel, în cazul rafinării electrolitice a cuprului, electrodul bipolar este format din cupru impur, la începutul electrolizei ; în decursul rafinării se compune parţial din cupru impur şi parţial din cupru rafinat, pentru ca în final aproape întregul electrod să fie format din cupru rafinat.

Procesul de electroliză cu dizolvare anodică poate să se desfăşoare în băi staţionare, pentru piese avînd dimensiuni mari, sau în băi rotative în cazul pieselor mici.

În operaţiile electrochimice efectuate în băi staţionare, piesele se suspendă pe şinele de alimentare cu curent prin intermediul unor dispozitive de suspendare verticale sau orizontale, — figura 5.4. La agăţarea pieselor se va avea în vedere ca acestea să nu se ecraneze între ele. Dispozitivele de suspendare se construiesc din metale conductoare (oţel, alamă, cupru) ; la dimensionarea dispozitivelor se vor avea în vedere rezistenţa mecanică şi densitatea de curent (care nu trebuie să depăşească 1 A/mm² pentru oţel, 1,5 A/mm² alamă, 2...3 A/mm² — cupru). Aceste dispozitive se izolează electric, cu excepţia locurilor de contact piesă-dispozitiv şi dispozitiv-şină catodică. Izolarea dispozitivelor este necesară pentru evitarea depunerii de metal

Scanned with OKEN Scanner

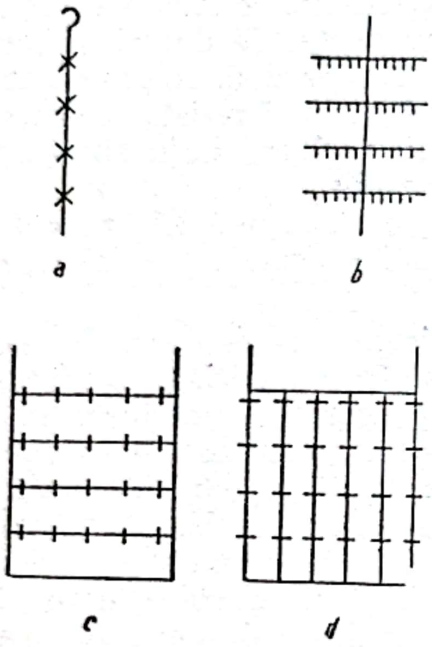


Fig. 5.4. Dispozitive de suspendare:
a — tijă; *b* — în formă de *T*; *c* — rame cu bare orizontale; *d* — rame cu bare verticale.

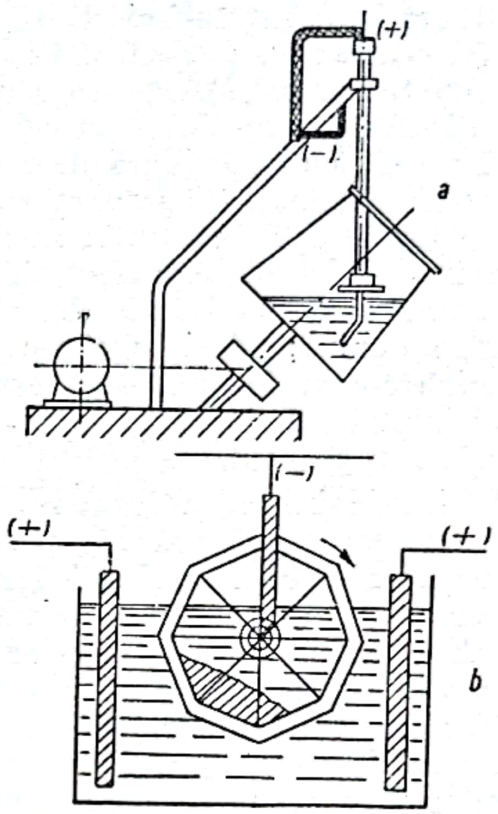


Fig. 5.5. Baie rotativă de galvanizare:
a — cu clopot; *b* — cu tambur.

din electrolit, a pierderii inutile de curent şi prevenirea coroziunii dispozitivelor. Materialele folosite pentru izolaţie, ca ceruri, materiale plastice, cauciuc trebuie să aibă un coeficient de elasticitate apropiat de al metalului şi să formeze un strat perfect aderent şi complet lipsit de pori.

Distanţa optimă dintre partea inferioară a piesei şi fundul cuvei este de 15 cm pentru piesele mici şi 40 cm pentru piesele mari; distanţa dintre partea superioară a piesei şi nivelul electrolitului este de 5,0...7,5 cm pentru piesele mici şi 30 cm pentru piesele mari.

Băile rotative — cu clopot sau cu tambur (fig. 5.5), sînt utilizate în galvanotehnică pentru acoperirea electrochimică a pieselor mici (nituri, şuruburi, piuliţe), în vederea măririi productivităţii, întrucît cu aceste utilaje se evită manopera de încărcare şi descărcare.

Contactele electrozilor. O problemă deosebit de importantă în instalaţiile de electroliză o constituie contactele dintre electrozi şi şinele de curent. Deoarece intensităţile de curent care trec prin electrolizor sînt de obicei apreciabile, iar tensiunile pe celulă sînt mici, rezistenţele de contact pot produce pierderi mari de energie. De exemplu, o intensitate de curent de 1 000 A, trecînd printr-o rezistenţă de 0,001 Ω, conduce la o cădere de tensiune în contact de 1 V. Dacă tensiunea la bornele celulei de electroliză este de 3 V, pierderea de energie electrică în contact va fi de 33%.

Rezolvarea constructivă a contactului depinde în primul rînd de cerinţele procesului tehnologic referitoare la schimbarea electrozilor. Astfel, la rafinarea electrolitică a metalelor, anodul constituie materia primă, iar catodul, produsul finit; prin urmare, electrozii trebuie periodic înlocuiţi, rapid şi fără multă manoperă, ceea ce atrage după sine realizarea convenabilă a contactului prin greutatea proprie a electrozilor, chiar dacă acesta măreşte întrucîtva rezistenţa electrică de contact. În figura 5.6, *a* este dată schema contactelor la rafinarea electrolitică a cuprului. Anodul *A* — prin intermediul unui braţ şi catodul *C* — prin intermediul urechilor *a* şi al şinei catodice *b*, se reazemă direct pe barele de curent, asigurînd contactul prin propria lor greutate.

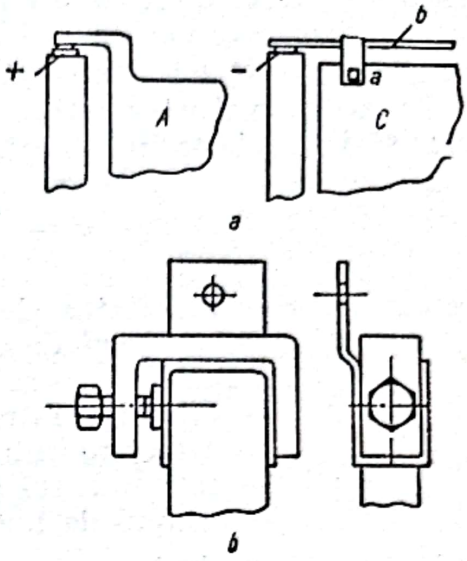


Fig. 5.6. Contactele electrozilor:
a — care se înlocuiesc periodic; *b* — care nu se înlocuiesc periodic.

Cu totul altfel se procedează cînd anodul este insolubil şi pe catod nu se depun produse solide şi prin urmare, ei nu trebuie înlocuiţi periodic. În acest caz contactul trebuie să fie perfect. În figura 5.6, *b* este redat modul de legare al unui electrod de cărbune de un element metalic intermediar.

Şinele şi barele de alimentare cu curent ale băilor de electroliză se execută din cupru sau alamă (v. § 5.1.5).

Diafragma unui electrolizor este un perete despărţitor, care permite trecerea curentului electric, dar împiedică amestecarea produselor de electroliză. Cerinţele faţă de o diafragmă sînt diferite, în funcţie de produsele de electroliză. În general, se disting trei situaţii tipice:

— trebuie separate produse de electroliză care sînt sub formă gazoasă la ambii electrozi (la electroliza apei sau a acidului clorhidric);

— trebuie separate produsele solide, care se formează de obicei la anod, faţă de catod (la rafinarea electrolitică a metalelor în soluţii apoase);

— produsele de electroliză sînt parţial sau total solubile în electrolit, diafragma trebuind să evite amestecarea lor (la electroliza clorurilor alcaline).

Diafragmele se confecţionează din ţesătură de azbest sau fire sintetice — diafragme filtrante şi din ciment — diafragme nefiltrante.

Instalaţiile auxiliare servesc la: recircularea, încălzirea, răcirea, agitarea şi filtrarea electrolitului; aspirarea şi comprimarea gazelor care se formează în timpul electrolizei.

Încălzirea electroliţilor se poate realiza *direct*, prin introducerea în electrolit a unor serpentine (parcurse de apă caldă, abur, gaz) sau termoplonjoare şi *indirect*, prin executarea vasului cu pereţi dubli, între care circulă apă caldă.

Scanned with OKEN Scanner

Încălzirea directă este mai economică ; cea indirectă se foloseşte în special pentru realizarea unei încălziri mai omogene, sau cînd agresivitatea electroliţilor ar scurta durata de viaţă a instalaţiei de încălzire.

În cazul încălzirii electrice, puterea P necesară încălzirii unei anumite cantităţi de electrolit se calculează cu formula

$$P = \frac{\rho' V c \Delta\theta}{3{,}6\,\eta t} \cdot 10^{-3} \quad [\mathrm{W}], \tag{5.12}$$

în care : ρ' este densitatea electrolitului, în kg/m³ ;
V — volumul de electrolit, în m³,
c — căldura specifică în J/kg°C ;
$\Delta\theta$ — diferenţa între temperatura finală şi temperatura iniţială a electrolitului, în °C ;
η — randamentul termic (circa 85%) ;
t — timpul de încălzire, în h ;

Răcirea electroliţilor este necesară într-o serie de procese electrochimice, ca : zincare, cuprare acidă, cromare etc. Răcirea se face cu ajutorul lichidelor de răcire, care circulă prin serpentine introduse în cuvă sau prin peretele dublu al cuvei.

Agitarea electroliţilor urmăreşte mai multe scopuri :
— micşorarea polarizaţiei catodice, respectiv anodice ;
— mărirea densităţii de curent ;
— mărirea vitezei de lucru.

Pentru realizarea agitării se folosesc mai multe procedee :
— insuflarea prin fundul băii a aerului comprimat de joasă presiune, filtrat în prealabil pentru a fi lipsit de impurităţi ;
— agitarea mecanică a electrolitului cu ajutorul pompelor, concomitent cu filtrarea ;
— deplasarea barelor catodice într-o mişcare alternativă ;
— agitarea cu ultrasunete, procedeu mai rar folosit, dar de cea mai mare eficacitate.

5.1.4. Sursele de alimentare ale instalaţiilor electrochimice

Instalaţiile de electroliză sînt consumatoare de curent continuu avînd intensităţi foarte ridicate, în general peste 10 kA şi tensiuni situate între 100 şi 1 000 V.

Schema cea mai simplă şi mai comodă de alimentare este aceea în care fiecare baie este alimentată separat, de cîte o sursă. În practică, o astfel de schemă conduce la o contradicţie : pe de o parte, celulele necesită tensiuni mici de alimentare, iar pe de altă parte, sursele de curent continuu sînt cu atît mai economice, cu cît tensiunile sînt mai ridicate. Soluţia raţională a acestei contradicţii este legarea mai multor celule în serie şi în paralel pentru ca sursa de alimentare să poată lucra la parametri optimi.

Scanned with OKEN Scanner

Curentul continuu se poate obţine direct, utilizînd generatoare de curent continuu sau redresoare.

Generatoarele de curent continuu au puterea limitată la circa 10 MW, datorită condiţiilor de comutaţie; această putere nu mai corespunde în condiţiile marilor instalaţii de electroliză, necesare în prezent în industria chimică. Instalaţiile în funcţiune confirmă utilizarea redresoarelor, care prezintă următoarele avantaje: randament ridicat, lipsa pieselor în mişcare, siguranţă în funcţionare şi posibilitatea folosirii unităţilor de mare putere.

Generatoarele de curent continuu pentru instalaţiile de electroliză sînt: maşina unipolară şi convertizoarele rotative.

Maşina unipolară (monopolară) este o maşină de curent continuu fără colector, capabilă să debiteze curenţi foarte intenşi, de 10...200 kA, la tensiuni reduse, de 10...20 V.

Funcţionarea maşinii unipolare are la bază fenomenul de inducere a unei t.e.m. constante într-un conductor electric ce se deplasează într-un cîmp magnetic uniform.

Cîmpul magnetic este produs de două bobine inelare *2* (fig. 5.7), dispuse de o parte şi de alta a rotorului masiv din oţel 3. Fluxurile magnetice produse de bobinele de excitaţie se închid prin proeminenţa centrală a rotorului şi prin statorul *1*. Dacă descompunem cilindrul proeminent al rotorului în pînze cilindrice, fiecare pînză va fi parcursă de flux de la interior spre exterior, ca şi cînd maşina ar avea un singur pol nord N în interior. Fiecare pînză se poate descompune la rîndul ei, într-un număr infinit de conductoare, dispuse după generatoarele suprafeţei sale cilindrice. În fiecare conductor elementar, de lungime egală cu generatoarea porţiunii cilindrice proeminente a rotorului, se induce o t.e.m.

$$E_p = v_p B_p l,$$

în care v_p este viteza conductoarelor pînzei, B_p — inducţia la nivelul conductorului respectiv, l — lungimea conductorului.

Cînd se trece de la un strat la altul, pe măsură ce raza creşte v_p se micşorează iar B_p creşte, astfel că $E_p = \text{ct}$. Curentul continuu se culege la periile *4*, amplasate la capetele rotorului.

Această maşină are următoarele avantaje: — produce curent riguros continuu (fără ondulaţii); — nu pune probleme de comutaţie, neavînd colector; — randamentul este suficient de ridicat (93%); — necesită puţin cupru. Prezintă însă cîteva dezavantaje, care au împiedicat răspîndirea ei pe scară largă, printre care uzura exagerată a periilor şi necesitatea unui număr foar-

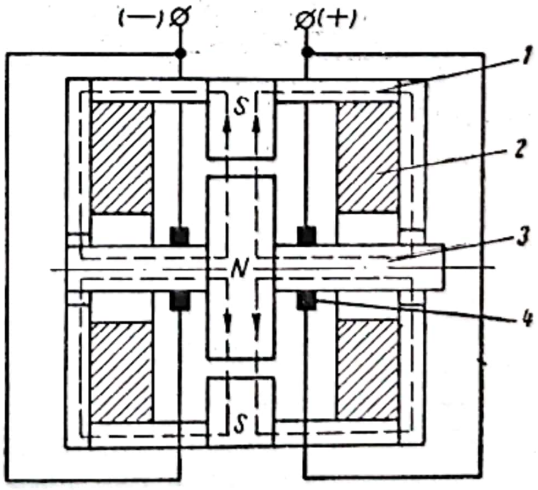


Fig. 5.7. Maşina unipolară.

te mare de perii (la 18,7 V şi 12 kA sînt necesare 160 perii). Înlocuirea periilor de grafit cu un sistem de perii de mercur conduce la eliminarea acestor dezavantaje.

Din categoria *convertizoarelor rotative* sînt luate în considerare grupul motor generator şi comutatoarea. Grupul motor-generator este compus dintr-un motor de curent alternativ (asincron sau sincron) şi un generator de curent continuu. Din cauza dificultăţilor de comutaţie, aceste maşini au tensiunea limitată la aproximativ 400 V şi puterea unitară maximă de 5 MW. Pentru a putea depăşi această limită de putere se realizează generatoare duble pe acelaşi ax, cu două colectoare.

Avantajele utilizării grupului motor-generator ca sursă de curent continuu sînt următoarele:

— tensiunea de curent continuu nu este influenţată de variaţia tensiunii din reţeaua de curent alternativ;

— tensiunea continuă poate fi uşor variată între 60 şi 400 V;

— prin răcirea corespunzătoare a maşinii (în circuit forţat de aer) se poate asigura un număr de ore de funcţionare relativ mare, corespunzător cu cerinţele instalaţiei de electroliză.

Principalele dezavantaje ale grupului motor-generator sînt:

— cost de investiţie ridicat;

— spaţiul mare ocupat şi necesitatea unei fundaţii;

— randament scăzut, de 90...92%.

Comutatoarea este o maşină electrică de construcţie specială, ce transformă curentul alternativ în curent continuu. Bobinajul indusului este parcurs în acelaşi timp de curent continuu şi alternativ; alimentarea indusului se face prin inele, ca la motorul asincron, iar culegerea curentului continuu se face de la un colector aflat pe partea opusă inelelor. Spre deosebire de grupul motor-generator, comutatoarea are un randament cu 2% mai bun, este mai ieftină şi ocupă un spaţiu mai redus. În schimb, prezintă următoarele dezavantaje:

— tensiunea continuă produsă se găseşte faţă de cea alternativă într-un raport fix, ceea ce implică utilizarea dispozitivelor speciale (autotransformator, regulator de inducţie etc), în scopul reglării tensiunii continue, complicînd şi mărind costul instalaţiei:

— în caz de supraîncărcări sau de variaţii bruşte ale sarcinii, apare pericolul cercului de foc la colector;

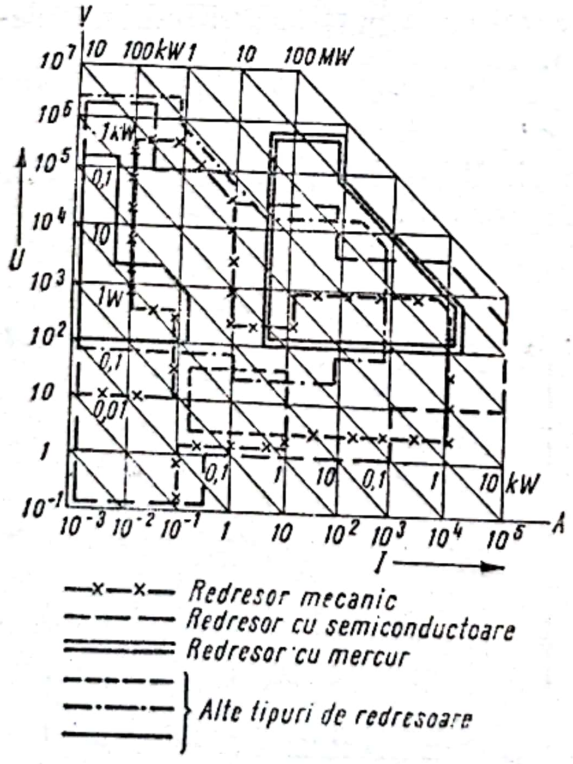


Fig. 5.8. Domeniile de utilizare ale diferitelor tipuri de redresoare.

— condiţiile de comutare sînt dificile, în special la intensităţile foarte mari cerute pentru electroliză.

În ultimele decenii s-a renunţat treptat la utilizarea comutatoarei, datorită dezvoltării instalaţiilor de redresare.

Redresoarele folosite pentru alimentarea instalaţiilor de electroliză sînt: cu vapori de mercur, cu contacte comandate şi cu diode semiconductoare (seleniu, siliciu, germaniu).

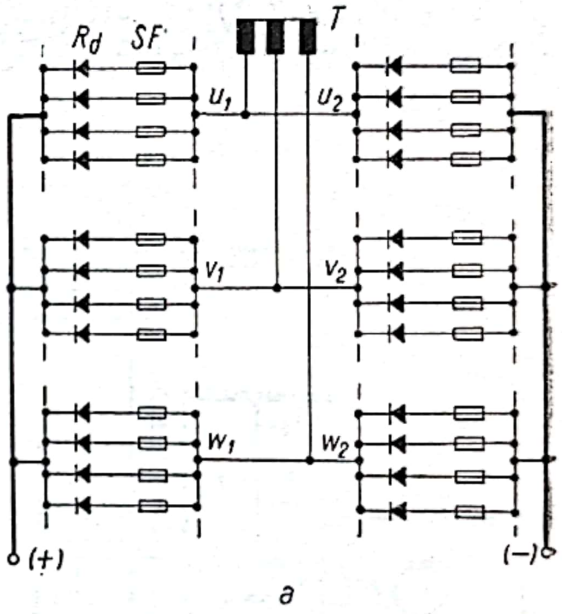
În figura 5.8 sînt reprezentate domeniile de utilizare ale diferitelor tipuri de redresoare.

Redresoarele cu vapori de mercur cu recipient metalic prezintă avantaje la tensiuni ce depăşesc 400 V, cînd randamentul se menţine la valori superioare convertizoarelor rotative.

Redresorul cu seleniu are o comportare bună la suprasarcini şi se întrebuinţează pentru puteri pînă la 1 MW şi tensiuni pînă la 100 V. Valoarea maximă a randamentului este de 88...90%.

Datorită avantajelor nete, în comparaţie cu celelalte sisteme de redresare a curentului alternativ (în special a randamentului, care depăşeşte 98%), redresoarele cu siliciu, constituite în instalaţii compacte, de volum şi greutăţi mici, cu puteri foarte mari, randamente ridicate, necesitînd o manoperă de întreţinere şi supraveghere scăzută s-au impus în alimentarea marilor instalaţii electrochimice.

Schemele de bază, folosite în mod curent la compunerea redresoarelor cu siliciu, sînt în punte trifazată (fig. 5.9, *a*) şi în stea dublă cu bobină de ab-



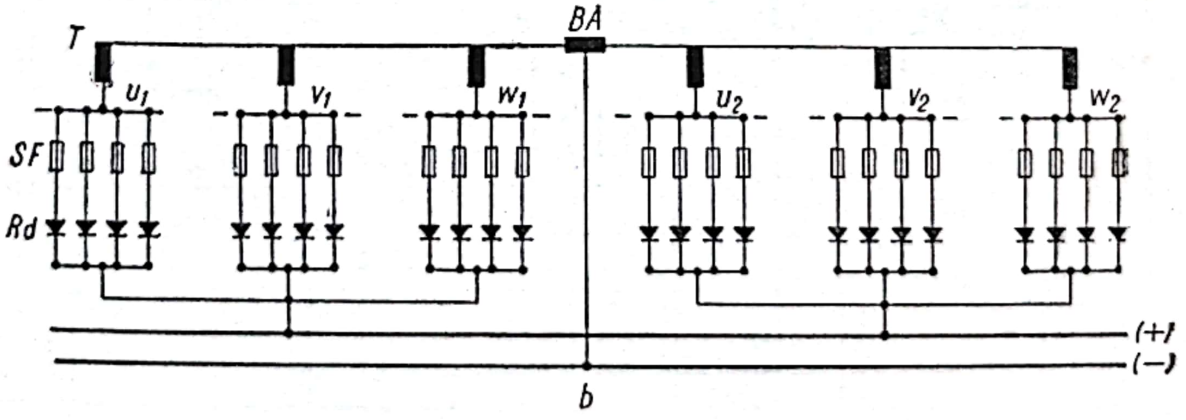


Fig. 5.9. Schemele de bază ale redresoarelor utilizate pentru alimentarea instalaţiilor electrochimice:

a — în punte trifazată; *b* — în stea dublă cu bobină de absorbţie; *T* — transformator de alimentare; R_d — celulă redresoare; *SF* — siguranţă fuzibilă; *BA* — bobină de absorbţie.

sorbţie (fig. 5.9, *b*). Pentru a se obţine intensitatea dorită a curentului continuu, grupele de celule redresoare se montează în paralel şi se dimensionează în aşa fel încît, atunci cînd una dintre ele s-ar defecta, sarcina să poată fi preluată pentru un timp limitat de cele rămase în serviciu.

5.1.5. Echipamentul electric al instalaţiilor de electroliză

Echipamentul electric al unei staţii de redresare ce alimentează o instalaţie de electroliză (fig. 5.10) se compune din : — celulele de înaltă tensiune ; — transformatorul redresorului ; — redresorul cu aparatajul aferent de conectare, măsură şi protecţie ; — barele de alimentare cu curent continuu a băilor de electroliză ; — aparatajul de reglare a curentului.

Variaţiile tensiunii la funcţionarea normală a băilor de electroliză nu depăşesc $\pm 5\%$, în schimb variaţiile provocate de punerea sau scoaterea din funcţiune a unor băi, pot lua valori foarte mari. Reglarea tensiunii redresoare

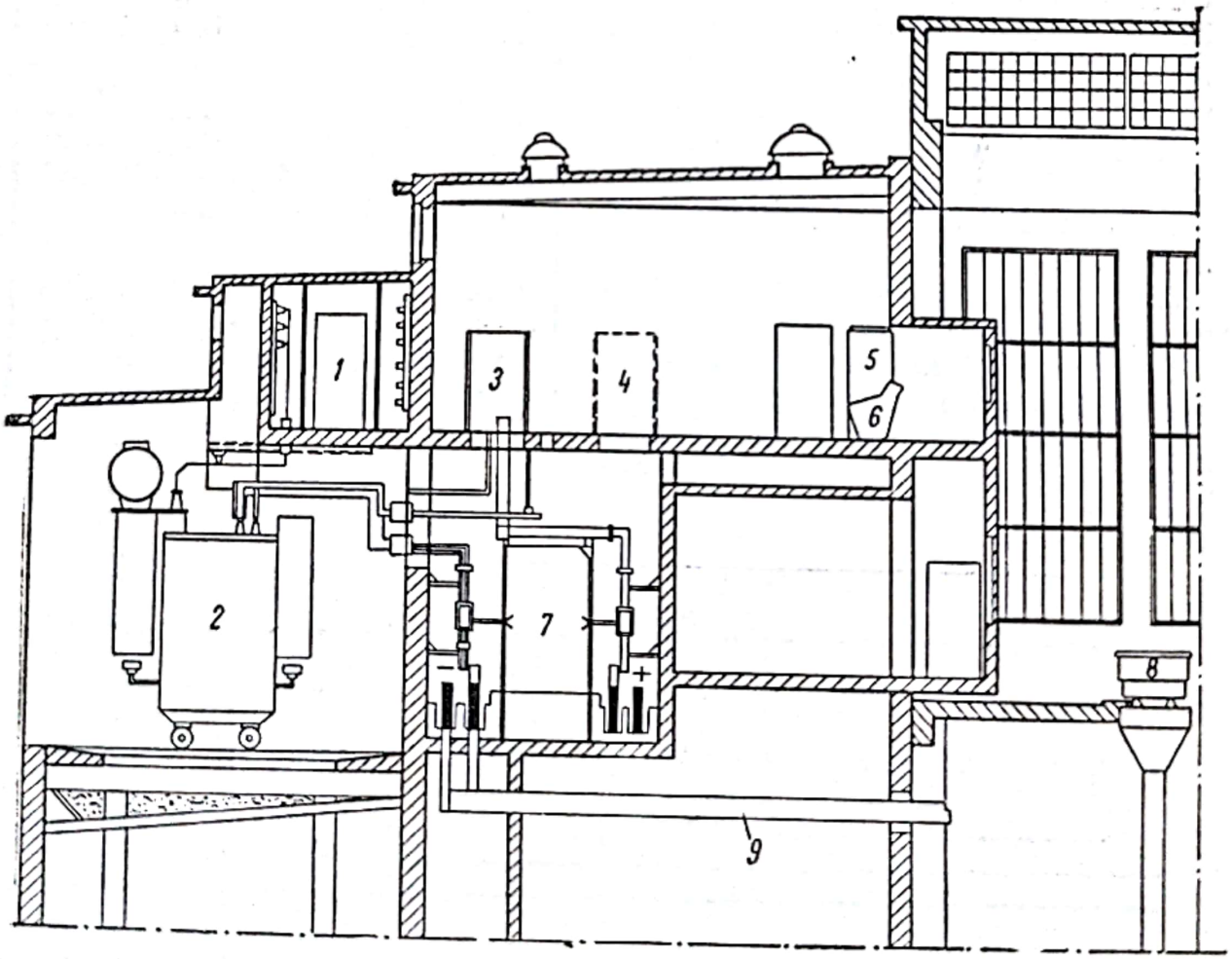


Fig. 5.10. Staţia de redresare a unei instalaţii de electroliză :
1 — celula de înaltă tensiune ; *2* — transformatorul redresorului ; *3, 4* — dulapuri cu redresoare ; *5* — echipamentul de comandă, măsură şi protecţie ; *6* — pupitrul de comandă ; *7* — canalul barelor de curent continuu ; *8* — băi de electroliză ; *9* — barele de alimentare cu curent a băilor.

Scanned with OKEN Scanner

lor în limite largi poate fi realizată cu ajutorul comutatoarelor în trepte manevrabile în gol sau sub sarcină, comutatoarelor stea-triunghi, autotransformatoarelor sau amplificatoarelor magnetice.

În figura 5.11 este reprezentată schema electrică a unei unităţi care debitează 20 kA la 460 V, pentru electroliza cuprului. Transformatorul de alimentare posedă în bobinajul primar un comutator în trepte şi un comutator stea-triunghi, pentru reglajul grosier al tensiunii. Amplificatoarele magnetice pentru reglarea precisă a tensiunii, sînt montate în aceeaşi cuvă cu transformatorul. Redresorul propriu-zis este compus din două dulapuri conţinînd fiecare cîte 114 de celule redresoare cu siliciu. Pe fiecare braţ al celor două punţi trifazate sînt cîte 24 celule conectate în paralel.

Ca protecţie contra scurtcircuitelor interne s-a prevăzut cîte o siguranţă ultrarapidă înaintea fiecărei celule redresoare. Contra scurtcircuitelor exterioare, protecţia este asigurată prin scurtcircuitoare, care sînt declanşate de traductoare polarizate cu impuls, pentru suprasarcină ; intrînd în acţiune, scurtcircuitorul provoacă deschiderea întreruptorului de înaltă tensiune al transformatorului. Protecţia contra supratensiunilor este asigurată de circuite *RC* legate în paralel cu celulele redresoare.

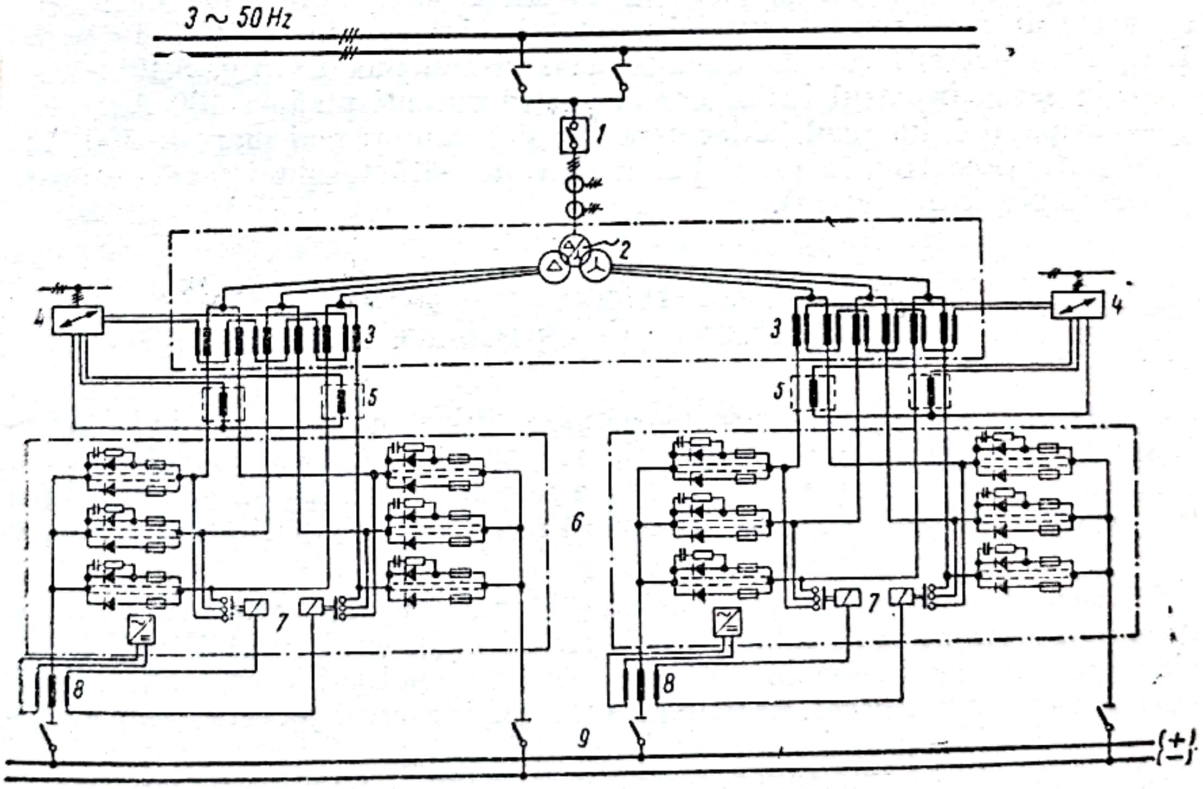


Fig. 5.11. Schema electrică a unei staţii de redresare pentru electroliză :
1 — întreruptor de înaltă tensiune ; *2* — transformatorul redresorului, inclusiv comutatorul în trepte şi stea-triunghi ; *3* — amplificatoare magnetice ; *4* — sistem de reglare automată a curentului ; *5* — traductoare de curent ; *6* — redresor cu siliciu (două dulapuri) ; *7* — scurtcircuitoare ; *8* — traductoare cu impuls pentru suprasarcini ; *9* — separatoare.

Scanned with OKEN Scanner

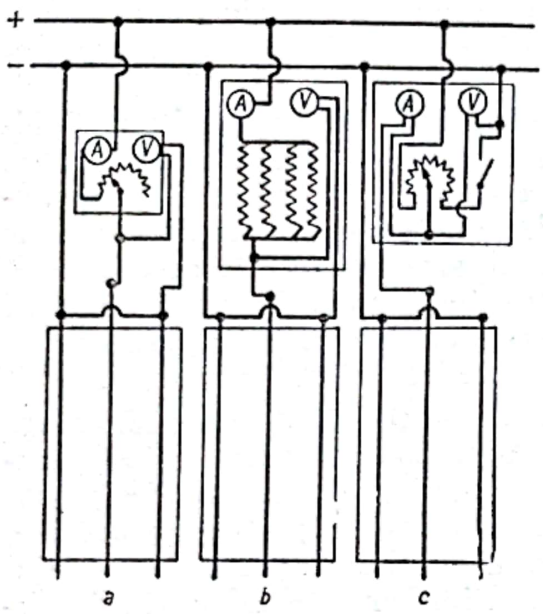


Fig. 5.12. Schema de legare a reostatelor unei băi de galvanostegie:
a — în serie; *b* — în paralel; *c* — potenţiometric.

Reglarea automată a curentului, a cărui variaţie admisibilă este de $\pm 0{,}2\%$, este asigurată de amplificatoarele magnetice *3*, comandate de regulatorul *4*, care menţine egalitatea intensităţilor curenţilor daţi de traductoarele *5*.

Şinele şi barele de alimentare cu curent ale electrolizoarelor se execută din cupru sau alamă şi se montează pe izolatoare, în execuţie deschisă sau acoperită (în canale sub pardoseală). Calculul secţiunii barelor se face pe baza pierderilor admisibile de tensiune (§ 1.5), verificîndu-se apoi încălzirea maximă admisibilă. Răcirea barelor se face cu aer, în circulaţie naturală sau forţată.

La alimentarea mai multor băi, pentru acoperiri galvanostegice, de la aceeaşi sursă, reglarea curentului se face printr-un reostat special montat în circuitul fiecărei băi în parte. Reostatele pot fi legate în circuitul băii în trei moduri (fig. 5.12):

— în serie, în cazul băilor care necesită curenţi pînă la 100 A;
— în paralel, în cazul băilor care necesită curenţi mai mari de 100 A;
— potenţiometric, în cazul băilor care necesită tensiuni foarte scăzute (de exemplu la argintare).

5.2. ELECTROLIZA SOLUŢIILOR APOASE ALE COMBINAŢIILOR METALICE

Electroliza soluţiilor apoase ale combinaţiilor metalice cuprinde hidroelectrometalurgia (extragerea şi rafinarea metalelor) şi galvanotehnica.

Extragerea şi rafinarea electrolitică a metalelor permite să se obţină metale de o foarte mare puritate şi uşurează recuperarea impurităţilor preţioase (aur, argint, bismut, cadmiu).

Hidroelectrometalurgia utilizează două procedee de electroliză: cu anozi insolubili şi cu anozi solubili. În procedeul cu anozi insolubili se folosesc electrozi inatacabili, iar ca electrolit — soluţia unei sări solubile a metalului care urmează a fi separat. Principala aplicaţie a acestui procedeu este extragerea zincului, cuprului, cadmiului, aurului, manganului etc. În procedeul cu anozi solubili se întrebuinţează ca anod un bloc din metalul care urmează a fi rafinat.

Scopul principal al galvanotehnicii îl constituie depunerea unui strat metalic de calitate superioară pe suprafaţa unui obiect.

Scanned with OKEN Scanner

5.2.1. Extragerea metalelor prin electroliza soluţiilor apoase

În principiu, metoda constă în tratarea minereului măcinat cu o soluţie apoasă de electrolit, care extrage metalul şi compuşii lui sub forma unei soluţii ionice. Electrolitul, bogat în ioni de metal, este supus înaintea electrolizei unei purificări, pentru îndepărtarea ionilor mai nobili decît ai metalului ce urmează să fie depus catodic.

Metodele hidroelectrometalurgice de extracţie a metalelor sînt economice chiar în cazul unor minereuri sărace sau complexe (minereuri care conţin metale preţioase şi rare). La acest avantaj, se adaugă şi faptul că, metalul obţinut pe cale electrolitică este mult mai pur decît cel obţinut pe cale pirometalurgică.

Procesul tehnologic depinde într-o foarte mare măsură de minereul ce urmează a fi prelucrat.

Extragerea electrolitică a zincului. În prezent, aproximativ 60% din producţia mondială de zinc este obţinută pe cale electrochimică. Procedeul permite obţinerea zincului foarte pur (99, 97 ... 99,99 % Zn), prelucrîndu-se atît minereuri bogate cît şi sărace. Prin dizolvarea în acid sulfuric a minereului calcinat se obţine soluţie de sulfat de zinc. Prin electroliză, la catodul din foi de aluminiu se depune zinc metalic, iar la anodul din plumb se degajă oxigen; ca urmare electrolitul îşi modifică compoziţia (scade concentraţia de zinc şi creşte aciditatea), ceea ce determină scăderea randamentului de curent; electrolitul epuizat este reutilizat pentru dizolvarea unor noi cantităţi de minereu. Băile pentru electroliza zincului sînt confecţionate din lemn sau beton armat, avînd pereţii interiori căptuşiţi cu tablă de plumb.

Datele orientative obţinute în industrie la extragerea zincului sînt: densitatea de curent 3...11 A/dm² (depinde de concentraţia iniţială a electrolitului); tensiunea la bornele băii 3,2...3,7 V; temperatura electrolitului 35...40°C; consumul de energie electrică 3 400 ... 4 000 kWh/t, faţă de 1 630 kWh/t cît reprezintă consumul teoretic; randamentul de curent 75 ··· 93%.

Extragerea electrolitică a cuprului. Hidroelectrometalurgia permite obţinerea pe cale electrolitică a cuprului din minereuri, separîndu-l de impurităţile care precipită sub formă de nămoluri anodice.

Electrolitul, o soluţie de sulfat de cupru (obţinută din minereu de cupru calcinat şi tratat cu acid sulfuric), se introduce în electrolizoare cu diafragme, avînd catozii din foi de cupru şi anozii din plumb sau grafit. Anozii sînt înconjuraţi de diafragme de flanelă, care împiedică îmbogăţirea soluţiei anodice în sulfat feric — substanţă care reduce randamentul de curent. Celulele de electroliză au o construcţie identică cu cele pentru extragerea zincului.

Tensiunea necesară electrolizei este de 1,8...2,5 V, densitatea de curent 0,6...2 A/dm², consumul de energie electrică este de 2000 ... 2 200 kWh/t faţă de consumul teoretic de 750 kWh/t, randamentul de curent 90% (scade la 65% în prezenţa sulfatului feric).

Scanned with OKEN Scanner

Extragerea electrolitică a cadmiului. 75% din producţia mondială de cadmiu se obţine pe calea hidroelectrometalurgiei. Extragerea cadmiului este posibilă prin electroliza soluţiei de sulfat de cadmiu (obţinută prin tratarea cu acid sulfuric a produselor secundare rezultate la extragerea zincului), în băi cu catozi de aluminiu şi anozi de plumb.

Tensiunea necesară la bornele unui electrolizor este de 2,6 V densitatea de curent 0,48 A/dm², randamentul de curent 80 ...90%, consumul specific de energie electrică 1 400 ... 1 600 kWh/t.

5.2.2. Rafinarea electrolitică a metalelor

Procedeul constă în dizolvarea anodică a unui metal brut (conţinînd impurităţi) obţinut pe cale pirometalurgică şi trecerea lui într-un metal deosebit de pur, prin depunere catodică. Impurităţile cad la fundul celulei de electroliză sub formă de nămol sau se dizolvă, rămînînd în soluţie.

Rafinarea metalelor are drept scop obţinerea unor metale deosebit de pure, superioare din punct de vedere al conductibilităţii electrice şi termice, al proprietăţilor mecanice, al rezistenţei la coroziune etc., precum şi recuperarea unor impurităţi valoroase, în special ale metalelor nobile. O serie întreagă de metale: cuprul, fierul, plumbul, argintul, aurul etc. sînt supuse rafinării electrolitice.

Rafinarea electrolitică a cuprului. Procesul de rafinare electrolitică a cuprului constă în dizolvarea anodică a cuprului brut (97,5 ...99,8% Cu) şi depunerea lui catodică, avînd ca rezultat cupru titrînd 99,9%. Prin rafinare se recuperează aurul şi argintul. De aceea, practic toată producţia mondială de cupru se rafinează electrolitic.

Electrolitul, constituit din soluţie acidulată de $CuSO_4$, este introdus în băile pentru electroliză, avînd anozii din plăci de cupru brut cu o grosime de 25... 50 mm şi o greutate de 150...300 kg, iar catozii din table subţiri de cupru electrolitic de 0,5...0,6 mm grosime.

Densitatea de curent admisibilă depinde de cantitatea de impurităţi conţinute în cuprul brut, fiind cuprinsă în limitele 0,2...0,3 A/dm². Tensiunea pe celulă este de 0,25 ... 0,30 V în cazul folosirii electrozilor monopolari şi de 17 V — pentru electrozi bipolari; consumul de energie electrică este de 250 kWh/t, respectiv 170 kWh/t.

Rafinarea electrolitică a fierului. Scopul rafinării este obţinerea fierului electrolitic, cu un conţinut minim de carbon. Avînd o mare permeabilitate magnetică, fierul electrolitic este utilizat în construcţia maşinilor şi aparatelor electrice.

Fierul se precipită electrolitic din soluţii de clorură sau de sulfat; anozii sînt executaţi, în general, din fontă, iar catozii sînt formaţi din plăci subţiri de fier electrolitic.

Băile funcţionează la temperatura de circa 95°C, cu o densitate de curent de 3...6 A/dm², mărită uneori pînă la 20 A/dm².

Scanned with OKEN Scanner

5.2.3. Galvanostegia

După natura obiectului care este acoperit, galvanotehnica se împarte în două operații distincte :

— *galvanostegia*, cuprinzînd operațiile prin care se acoperă un obiect metalic cu un strat mai mult sau mai puțin gros dintr-un alt metal, în scop decorativ sau de protecție (mărirea durității superficiale, a rezistenței anticorosive etc.) ;

— *galvanoplastia*, cuprinzînd operația de acoperire a unui material izolant, făcut în prealabil conductor. Prin această operație se urmărește reproducerea unui obiect cu ajutorul unui metal (în general cupru), care trebuie să se desprindă ușor de pe matrița care formează catodul.

Stratul metalic depus prin galvanostegie trebuie să aibă următoarele calități :

— structura compactă, formată din cristale mici ;
— rezistență mecanică ridicată ;
— aderență bună ;
— să nu fie friabil la îndoire ;
— să aibă aceeași grosime pe toată suprafața acoperită.

Galvanostegia (acoperirea metalică) este ramura cea mai importantă a galvanotehnicii, datorită numeroaselor sale aplicații :

— în scop decorativ și protector — decorativ (nichelare, cromare, cuprare, argintare, aurire) ;
— pentru mărirea rezistenței la uzură a pieselor de mașini și aparate (cromare) ;
— pentru restabilirea cotelor pieselor uzate ale mașinilor unelte și ale motoarelor cu ardere internă (cromare dură) ;
— pentru mărirea rezistenței la coroziune a pieselor destinate a funcționa în medii corosive (zincare, cadmiere, depuneri de staniu, plumb etc.) ;
— pentru îmbunătățirea proprietăților electrice ale diferitelor piese (cuprare, argintare, aurire) ;
— pentru mărirea factorului de reflexie a farurilor și reflectoarelor (nichelare, cromare).

În principiu, pentru a obține o acoperire galvanostegică se supune electrolizei o sare a metalului care urmează a fi depus la catod, întrebuințînd un anod solubil format din același metal în stare cît mai pură ; catodul este reprezentat de obiectul metalic — suport care trebuie acoperit și a cărui suprafață a fost pregătită în prealabil.

Proprietățile stratului depus depind de factorii fizico-chimici, care acționează în timpul electrolizei. Uniformitatea absolută a grosimii stratului este greu de realizat, din cauza proprietății soluției de electroliză de a dispersa liniile de curent, îngrămădindu-le spre extremitățile electrozilor. Densitatea curentului va fi mai mare la marginile electrozilor, unde se obține o depunere groasă, neregulată, în timp ce la centru se va depune un strat mai subțire. Se pot obține totuși depuneri de aceeași grosime, atunci cînd soluția de elec-

Scanned with OKEN Scanner

troliză are o bună putere de pătrundere. *Puterea de pătrundere* este proprietatea soluţiei de electroliză, de a provoca abateri de la legea lui Ohm, abateri care să permită depuneri uniforme chiar şi pe un electrod profilat; mărimea ei este direct proporţională cu polarizarea catodică şi conductivitatea soluţiei şi invers proporţională cu randamentul de curent.

Aderenţa perfectă a unui depozit metalic este condiţionată de posibilitatea formării unei soluţii solide între metalul de bază şi metalul depus; în acest caz, metalul depus difuzează în metalul de bază pe o adîncime de cîţiva microni, formînd un strat intermediar de aliaj, extrem de subţire dar suficient ca să fixeze metalul depus pe suport. Pentru a mări aderenţa în situaţia în care cele două metale nu formează aliaje, se va acoperi în prealabil metalul de bază cu un strat de cupru (cuprare).

Prin pregătirea suprafeţei metalului suport se înţelege curăţirea perfectă a acesteia de impurităţi (praf, ulei, nisip, grăsime etc.), avînd ca rezultat realizarea unei aderenţe perfecte a depozitului metalic pe suprafaţa metalului suport. Pregătirea suprafeţei comportă o serie de operaţii mecanice şi chimice:

a) curăţirea mecanică de impurităţi grosiere prin şlefuire, periere, suflare cu alice sau nisip, introducerea pieselor mici în tobe rotitoare împreună cu cantităţi mici de apă şi nisip etc.;

b) lustruirea electrolitică — prin care se dizolvă electrolitic rugozităţile de pe suprafaţa piesei legată la anod — urmează de cele mai multe ori prelucrării mecanice;

c) degresarea — îndepărtarea grăsimilor şi a uleiurilor minerale, se poate face pe cale chimică, folosind dizolvanţi organici (benzen, toluen, benzină, tricloretilenă etc.), soluţii alcaline (NaOH, Na_2CO_3, K_2CO_3) sau electrolitic folosind densităţi mari de curent la catod (cel puţin 100...200 A/mm²);

a) decaparea-vizează îndepărtarea oxizilor, zgurelor şi altor impurităţi, prin tratarea pieselor cu un acid puternic, ca H_2SO_4, HNO_3, HCl sau HF, la temperaturi ridicate (apropiate de cea de fierbere);

e) băiţuirea este o decapare foarte uşoară, cu soluţii slab acide, avînd drept scop îndepărtarea peliculei de oxid de la suprafaţa metalului.

Obiectele cu suprafeţele astfel tratate se spală bine cu apă şi apoi se introduc în electrolizor.

Electrolitul folosit în galvanostegie conţine de obicei următoarele componente:

— o combinaţie a metalului (sare simplă sau complexă), care furnizează ionii ce urmează a fi depuşi la catod;

— un electrolit oarecare pentru mărirea conductivităţii soluţiei;

— o substanţă care să faciliteze dizolvarea anodului şi să împiedice trecerea lui în stare pasivă;

— adaosuri (agenţi auxiliari) care să influenţeze structura depozitului catodic în sensul dorit (substanţe coloidale, agenţi de luciu etc.).

Cuvele de electroliză, de formă paralelipipedică, pot atinge 3...5 m lungime- lăţime şi 1 m înălţime, avînd o capacitate de 150...1 700 l. Încălzirea electrolitului se face cu aburi sau electric, cu rezistoare. Pentru a

obţine un strat de acoperire uniform, electrolitul este agitat mecanic sau prin barbotare cu aer comprimat.

Pentru piese de dimensiuni mici se utilizează tobe sau clopote de galvanizare (fig. 5.5).

După scoaterea din băile de electroliză, piesele sînt spălate cu apă. Se recomandă ca după ultima spălare piesele să se usuce, pentru a îndepărta eventualele resturi de electrolit care corodează sau pătează suprafeţele metalice.

Nichelarea se aplică în special fierului şi mai puţin pieselor de zinc, aluminiu etc. Piesele degresate şi decapate electrolitic într-o soluţie de acid sulfuric, sînt cuprate şi introduse sub curent în baia de nichelare, pentru a nu fi atacate de soluţie. În băile de electroliză se folosesc soluţii de sulfat de nichel sau săruri duble de nichel şi sulfat de amoniu, a căror conductivitate se măreşte prin adaus de săruri neutre, ca sulfat sau clorură de amoniu, citrat sau benzoiat de sodiu. Anozii sînt din nichel electrolitic.

În cazul nichelării normale, pentru un strat de nichel de 0,015 mm este necesară o densitate de curent de 0,15 A/dm². În cazul nichelării rapide grosimea stratului depus creşte la mai mult de 0,025 mm, iar densitatea de curent ajunge pînă la 15 A/dm². În timpul nichelării, baia a cărei temperatură este de 45—59 °C trebuie agitată.

Cromarea. Depunerile de crom aderă bine la metalul suport, au o mare duritate şi rezistenţă la temperaturi ridicate (600...800 °C). În industrie se utilizează cromarea dură, care dă peliculei de crom o grosime de 25μm. Cromarea se face în soluţii de acid cromic, băile lucrînd la o temperatură de 40 °C şi o densitate de curent de 5,7...15,5 A/dm². Anozii sînt confecţionaţi din plăci de plumb.

5.3. FABRICAREA ELECTROLITICĂ A HIDROGENULUI ŞI A OXIGENULUI

Cea mai simplă metodă pentru obţinerea hidrogenului şi a oxigenului în starea cea mai pură este electroliza apei. Descompunerea apei se produce la trecerea curentului continuu printr-o soluţie apoasă diluată de sodă caustică sau acid sulfuric. La catod se descarcă hidrogenul, iar la anod-oxigenul.

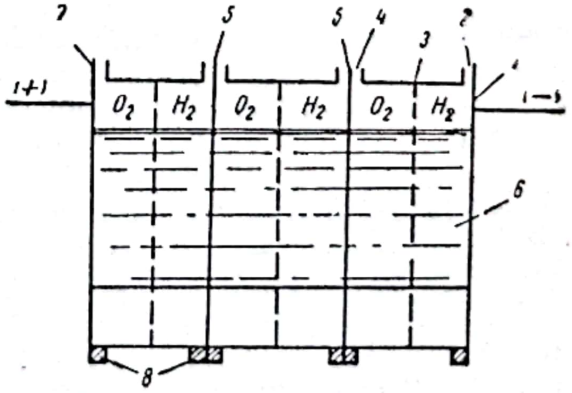


Fig. 5.13. Celulă pentru electroliza apei cu electrozi bipolari, tip filtru-presă:
1 — catod marginal; *2* — conductă pentru hidrogen; *3* — diafragmă; *4* — conductă pentru oxigen; *5* — electrozi bipolari; *6* — electrolit; *7* — anod marginal; *8* — izolatoare.

Celulele de electroliză pot fi cu electrozi monopolari sau bipolari (fig. 5.13). Pentru separarea hidrogenului şi oxigenului, descărcaţi la cei doi electrozi, se folosesc diafragme din ţesături dese de azbest. Prin asamblarea mai multor celule unitare în formă de rame, se obţine un electrolizor tip filtru-presă.

Electrolizoarele moderne lucrează cu densităţi de curent de 10...25 A/dm², randamente de curent apropiate de 100%; consumul de energie electrică este de 4,5...6 kWh pentru 1 m^3H_2 şi 0,5 m^3O_2, la o tensiune de 1,9...2,6 V.

5.4. ELECTROLIZA CLORURILOR ALCALINE

Scopul electrolizei clorurilor alcaline îl constituie obţinerea hidroxizilor alcalini (de sodiu) şi a clorului.

Soluţiile apoase de clorură de sodiu conţin ioni de Na^+ şi Cl^-, precum şi ioni proveniţi din disocierea apei H^+ şi OH^-. Prin urmare la catod se pot descărca ioni Na^+ şi H^+, iar la anod Cl^- şi OH^-.

Dacă drept catod se utilizează fierul, atunci se va descărca exclusiv ionul H^+ şi nu ionul Na^+. Ionii rămaşi în soluţie, Na^+ şi OH^-, formează hidroxidul de sodiu în apropierea anodului. Descărcarea sodiului metalic din soluţii apoase nu reuşeşte decît pe un catod de mercur.

Anozii se confecţionează din grafit. Celula de electroliză este prevăzută cu o diafragmă din azbest sau ciment, care separă celula într-un compartiment anodic şi unul catodic, împiedicînd astfel amestecarea clorului cu hidroxidul de sodiu.

Tensiunea care trebuie aplicată unei celule este de 4...4,8 V, iar randamentul de curent de 92...96%. Consumul de energie electrică este de 2 700... 3 300 kWh/t de clor.

5.5. EXTRAGEREA ŞI RAFINAREA ALUMINIULUI PRIN ELECTROLIZA SĂRURILOR TOPITE

Electroliza sărurilor topite nu diferă principial de electroliza soluţiilor apoase. Din cauza temperaturilor mult mai ridicate şi, în consecinţă, a reactivităţii mult mai mari a substanţelor, a solubilităţii metalului depus catodic în electrolitul topit etc., apar însă o serie de complicaţii, datorită cărora procesele care au loc la electroliza sărurilor topite sînt mai puţin cunoscute decît cele de la electroliza soluţiilor apoase. Dintre aceste complicaţii se menţionează reducerea randamentului de curent şi *efectul anodic*, care constă în apariţia unor mici descărcări însoţite de scîntei la anod, avînd ca rezultat o degajare mare de gaz ce îndepărtează topitura de anod, întrerupînd electroliza. Extragerea şi rafinarea aluminiului este cea mai importantă industrie bazată pe electroliza sărurilor topite.

Metalurgia aluminiului se bazează exclusiv pe extragerea lui din bauxită ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), comportînd două faze distincte şi anume: transformarea bauxitei prin tratare cu o soluţie de sodă caustică, în alumină (Al_2O_3) şi

electroliza acesteia într-o baie de criolit topit (Na_3AlF_6). Electroliza aluminei are loc la temperaturi de circa 950 °C, în cuve paralelipipedice din oţel (fig. 5.14), căptuşite cu cărămizi refractare *1*, peste care se aplică un strat de plăci din cărbune *2* — blocul catodic, legat prin bara catodică de oţel *3* la ansamblul anodic al electrolizorului următor.

Ansamblul anodic este format dintr-o ramă metalică pe care sînt prinse barele anodice de aluminiu *4*. Rama metalică împreună cu barele anodice, pot fi ridicate şi coborîte. De barele anodice sînt fixaţi anozii precopţi (din cocs aglomerat cu gudron) *5*, utilizaţi şi la Uzina de aluminiu de la Slatina.

Incălzirea băii se face în absenţa materialului de prelucrat, prin scurtcircuitarea electrozilor cu rezistoare de cărbune ; fără a întrerupe curentul se introduce criolitul, iar cînd s-a atins nivelul dorit al băii se scot rezistoarele. La introducerea aluminei în baie are loc o cădere de tensiune de la valoarea iniţială de 15...20 V la 6 V ; densitatea de curent se menţine la 50...60 A/dm², iar temperatura puţin sub 950 °C.

Distanţa dintre anozi şi suprafaţa catodului (aluminiul topit 6) se menţine la 50...100 mm. Pentru a asigura constanţa temperaturii băii şi a evita fenomenele secundare la electrozi, concentraţia de alumină trebuie să fie de 10...20%. În baie, alumina 7 se descompune la o tensiune de aproximativ 7 V. În timpul electrolizei concentraţia de alumină scade, tensiunea atinge valori de 15...20 V şi începe descompunerea criolitului. În acest moment se introduc în cuvă noi cantităţi de materie primă. Dacă concentraţia de alumină ajunge la 2 ... 3%, iar curentul depăşeşte o valoare critică, apare efectul anodic.

Anozii reacţionează cu oxigenul ce se degajă şi se consumă, din care cauză sînt coborîţi treptat. Aluminiul pus în libertate la catod rămîne la fundul cuvei, de unde este scos la 2...3 zile printr-o vană plasată în fundul băii.

Randamentul de curent este de 88%. Pentru o tonă de aluminiu extras se consumă circa 19000 kWh, 1500 kg criolit, 600 kg anozi, 2000 kg alumină şi diverşi fondanţi. Instalaţiile industriale au o tensiune de 200...500 V şi un curent de 30...120 kA.

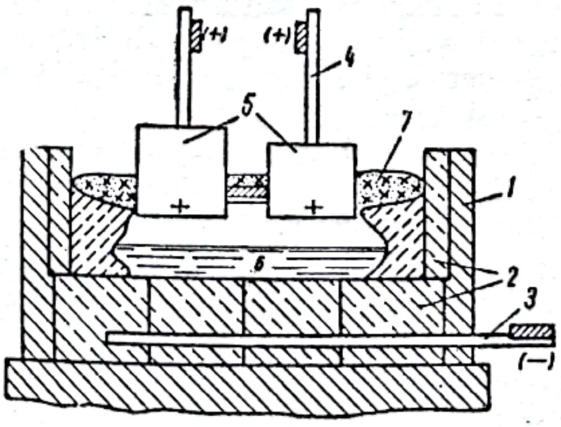
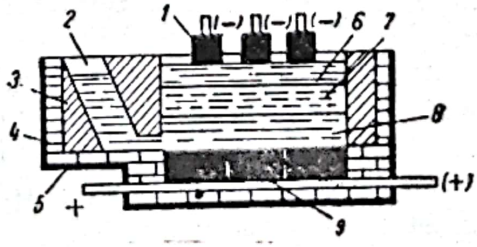


Fig. 5.14. Schema unui electrolizor cu anozi precopţi pentru extragerea aluminiului.

Fig. 5.15. Celulă de rafinare electrolitică a aluminiului.



Aluminiul obţinut conţine aproximativ 99,4...99,8% aluminiu. Printr-o rafinare ulterioară se obţine un conţinut minim de 99,99% Al.

Principiul rafinării este similar cu cel folosit în hidroelectrometalurgie, deosebirea fiind că electrolitul este format din săruri topite şi nu din soluţii apoase. Electrolizorul pentru rafinare (fig. 5.15) este format dintr-o cutie de tablă de oţel *5* căptuşită cu cărămizi refractare *4*. Baza este formată din blocuri de grafit *9* care au rolul de anozi. Pereţii sînt căptuşiţi cu un al doilea strat de magnezită *3*, care formează pe o parte un puţ înclinat *2*, ce serveşte la separarea impurităţilor şi la alimentarea electrolizorului cu aluminiu topit sau solid. Cuva de electroliză conţine trei straturi topite suprapuse:

— la fund, aliajul anodic de aluminiu *8*, supus rafinării;

— la mijloc, electrolitul topit *7*, (amestec de AlF_3, NaF, $BaCl_2$);

— deasupra, stratul catodic de aluminiu rafinat *6*.

La trecerea curentului, aluminiul se dizolvă din aliajul anodic, trece în electrolit şi se depune în stare pură la catodul de grafit *1*.

Impurităţile de aluminiu se acumulează în aliajul anodic şi în cazul în care conţinutul lor depăşeşte o anumită limită, ele se separă din aliajul topit şi se îndepărtează din electrolizor prin puţul lateral.

Colectarea aluminiului se face la 2...3 zile prin sifonare.

La densităţile de curent ridicate cu care se lucrează, de pînă la 150 A/dm², căderile de tensiune ating valoarea de 5,6 V. Consumul de energie electrică este de 17000 kWh/t de Al rafinat.

5.6. APLICAŢIILE TEHNICE ALE FENOMENELOR ELECTROCINETICE

Migrarea particulelor disperse într-un lichid sub acţiunea unui cîmp electric se numeşte electroforeză, iar curgerea unui lichid printr-o capilară sau diafragmă, sub acţiunea unui cîmp electric, se numeşte electroosmoză. În primul caz particulele solide se deplasează faţă de lichid, în cazul al doilea, lichidul se deplasează faţă de peretele solid al capilarei sau diafragmei. Deplasările reciproce a două faze eterogene, sub acţiunea cîmpului electric fac parte din aşa numitele fenomene electrocinetice şi îşi găsesc explicaţia în încărcarea electrică reciprocă a celor două faze.

Aplicaţiile tehnice ale fenomenelor electrocinetice nu se pot compara ca importanţă cu celelalte tehnologii electrochimice. Fenomenele electrocinetice au găsit însă variate şi interesante aplicaţii şi anume:

— electroforeza se utilizează în purificarea caolinului, în acoperirea suprafeţelor metalice cu bitum, cu latex, cu răşini etc., în vopsirea electroforetică, în industria tuburilor electronice etc.;

— electroosmoza a găsit aplicaţii în deshidratarea turbei, a caolinului etc.

Scanned with OKEN Scanner

Vopsirea electroforetică. În figura 5.16 este reprezentată o cuvă de vopsire. Obiectul de vopsit *1*, de obicei de oțel, acoperit cu un strat de fosfat, este legat la polul pozitiv al sursei de alimentare, pe cînd polul negativ este legat de peretele cuvei *2*. Suspensia coloidală de pigment *3* conține aproximativ 10 % substanță solidă și este foarte fluidă. Sub acțiunea cîmpului electric, particulele coloidale de pigment, încărcate negativ, migrează electroforetic spre anod și se depun pe suprafața acestuia, sub forma unui strat compact.

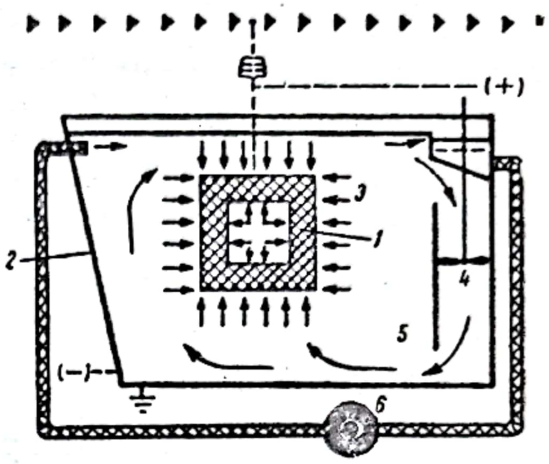


Fig. 5.16. Cuvă de vopsire electroforetică.

Pentru omogenizarea suspensiei, aceasta este agitată continuu și intens printr-o recirculare a soluției. Pentru aceasta servește agitatorul cu palete *4*, clapeta de reglare *5* și pompa de recirculare *6*.

Tensiunea utilizată este cuprinsă de obicei între 150...250 V. Cu cît este mai mare tensiunea aplicată, cu atît este mai gros stratul depus.

Densitatea de curent inițială este mare, de ordinul 100...200 A/m²; cu creșterea grosimii stratului de pigment depus, scade însă spre zero. Operația de vopsire se termină în 1...2 minute.

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 6

PRELUCRAREA ELECTRICĂ A METALELOR

Folosirea directă a energiei electrice la prelucrarea metalelor (electroprelucrarea) reprezintă un procedeu tehnologic modern, care s-a impus la prelucrarea metalelor dure, oţelurilor refractare, oţelului călit, fontei albe etc.

Electroprelucrarea utilizează curentul electric în diferite procedee de lucru:

— o acţiune directă de erodare obţinută printr-o descărcare electrică sub formă de scînteie sau impuls electric, produsă între doi electrozi, dintre care unul îl constituie piesa de prelucrat (anodul) — procedeu denumit prelucrare prin *electroeroziune* sau prin scîntei, impulsuri electrice, realizate într-un dielectric lichid;

— o acţiune electroerozivă datorată unui proces de descompunere chimică sub forma electrolizei, prin care se pun în libertate ioni activi-procedeu denumit *prelucrare electrochimică* sau electrolitică;

— o acţiune electrochimică şi electrotermică combinate cu o acţiune mecanică efectuată de o sculă, în scopul detaşării unui strat de material dintr-o piesă-procedeu denumit *prelucrare anodo-mecanică:*

— o acţiune electrotermică combinată cu acţiunea mecanică a sculei-procedeu denumit *prelucrarea prin contact electric:*

— *prelucrarea electrohidraulică* constă în deformarea cu mare viteză a tablelor, produsă de unda de şoc generată de o descărcare electrică într-un mediu lichid (apă):

— *prelucrarea electromagnetică* are aceeaşi acţiune de deformare ca şi prelucrarea electrohidraulică şi se bazează pe forţele electromagnetice ce se exercită asupra unui corp conductor introdus într-un cîmp magnetic variabil în timp;

Scanned with OKEN Scanner

— *tăierea metalelor cu plasmă* (v. §. 4.4) face parte din procedeele de tăiere prin topire şi prezintă avantaje atît faţă de tăierea cu oxigen, a cărei domeniu de aplicare este limitat de condiţia ca metalul să aibă temperatura de aprindere în oxigen mai mică decît temperatura de topire, cît şi faţă de tăierea cu flacără de gaz sau arc electric, avînd în vedere că plasma este mult mai concentrată şi temperatura ei este mult mai mare;

— *prelucrarea metalelor cu fascicul de lumină* (laser), permite tăierea şi găurirea materialelor avînd dimensiuni extrem de mici, cum sînt grilele tuburilor electronice, circuitele ultraminiaturale de diferite tipuri (v. § 4.6).

6.1. PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE

Prelucrarea prin electroeroziune se utilizează la: prelucrarea metalelor dure şi extradure, executarea găurilor cu diamteru mic (sub 1 mm) sau cu forme complicate (de exemplu în spirală), executarea suprafeţelor cu forme complicate (diferite matriţe), ascuţirea unor scule aşchietoare cu plăcuţe de carburi metalice etc.

Avantajele prelucrării prin electroeroziune în comparaţie cu prelucrarea prin abrazive sînt următoarele:

— posibilitatea prelucrării metalelor şi aliajelor dure, fără schimbarea esenţială a proprietăţilor fizico-mecanice;

— eliminarea tratamentelor termice ulterioare, deoarece nu există nici un contact între sculă şi piesă, prelucrarea efectuîndu-se fără nici un aport sau degajare de căldură;

— necesitatea controlului pieselor este redusă în mod considerabil, deoarece ca urmare a durabilităţii mari a sculei, forma prelucrată a fiecărei piese se repetă fidel atît din punct de vedere geometric cît şi în ceea ce priveşte calitatea suprafeţei prelucrate;

— după prelucrare nu mai este necesară nici debavurarea şi nici ajustarea pieselor.

Dezavantajele acestui procedeu sînt legate de consumul specific ridicat de energie electrică şi de durata de prelucrare, de obicei mai mare decît la prelucrarea mecanică.

Prelucrarea prin electroeroziune se bazează pe descărcările electrice sub formă de scîntei, emise periodic între doi electrozi, anod-piesă şi catod-sculă, introduşi într-un dieletric lichid (petrol sau ulei). Energia electrică a descărcării se transformă în energie termică care topeşte şi volatilizează materialul anodului în zona de lucru.

Dielectricul lichid are rolul de a intensifica acţiunea distructivă a descărcării, prin aceea că particulele conducătoare, conţinute în suspensie în dielectric împreună cu produsele de descompunere ale dieletricului, se aşază de-a lungul liniilor de cîmp electric dintre cei doi electrozi, formînd o punte conducătoare între aceştia. Căldura dezvoltată în timpul descărcării determină evaporarea unei părţi din dielectric, ceea ce favorizează producerea descărcărilor urmate de îndepărtarea metalului desprins de pe anod. Tot-

Scanned with OKEN Scanner

odată, lichidul răcește anodul și împiedică depunerea particulelor de metal pe catod.

Valoarea energiei de descărcare este determinată de durata și amplitudinea curentului de alimentare și de căderea de tensiune dintre electrozi. Din punct de vedere al sursei de alimentare utilizate, prelucrarea prin electroeroziune prezintă două variante: prelucrarea prin scîntei electrice și prelucrarea prin impulsuri electrice.

Prelucrarea prin scîntei electrice este folosită mai ales la executarea operațiilor de găurire, alezare, rectificare a suprafețelor și la confecționarea matrițelor de dimensiuni mici și cu forme complicate.

Schema electrică de principiu a generatorului de relaxare pentru prelucrarea prin scîntei (fig. 6.1, *a*) conține un condensator de capacitate C, care se încarcă de la un generator de curent continuu printr-un rezistor R, pînă cînd tensiunea atinge valoarea de descărcare U; dielectricul dintre electrozi fiind străpuns, energia electrică acumulată în condensator se eliberează sub forma unei descărcări electrice oscilante amortizate — impulsul de curent i (fig. 6.1, *b*). Energia de descărcare

$$W_e = \frac{C \cdot U^2}{2} \qquad (6.1)$$

trebuie să se producă într-un timp scurt, de ordinul a 10^{-3} s și chiar mai puțin.

Debitul de metal erodat este proporțional cu energia de descărcare și cu frecvența descărcărilor [86]. Prin mărirea capacității la tensiune constantă se mărește energia, dar crește și timpul t_s în care se produce încărcarea și descărcarea, ceea ce atrage scăderea productivității.

Pentru aceeași distanță între electrozi se constată că, printr-o scădere a tensiunii de descărcare a condensatorului la 67...77% din tensiunea de alimentare, se produce o majorare pînă la 100% a frecvenței.

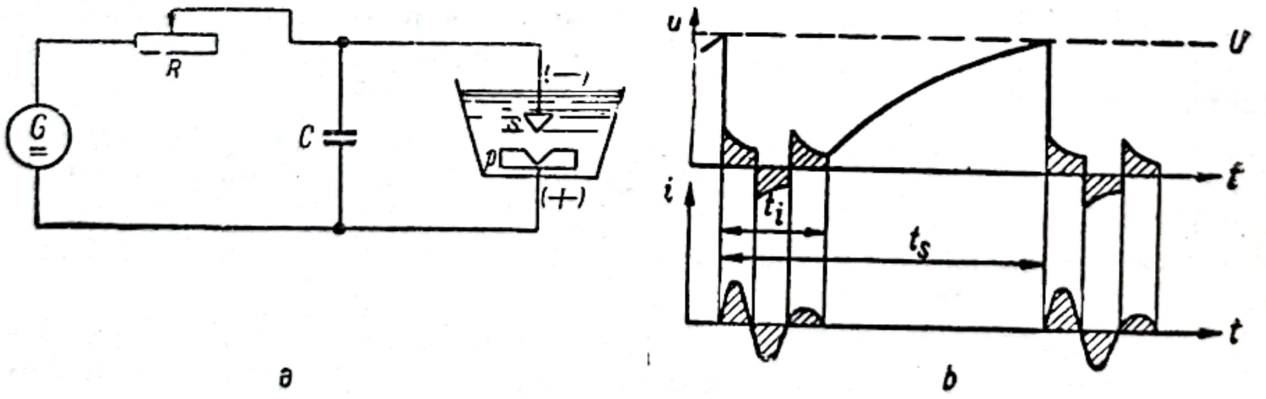


Fig. 6.1. *a* — Schema electrică de principiu a generatorului de relaxare pentru prelucrarea prin scintei electrice:

G — generator de curent continuu; *R* — rezistor; *C* — baterie de condensatoare; *S* — catodul-sculă; *P* — anodulpiesă.

b — Variația tensiunii u și a curentului i de descărcare: t_i — durata impulsului; t_s — durata de succesiune a impulsurilor.

Rezistorul din circuitul de încărcare are rolul de a limita curentul de descărcare. El are influenţă şi asupra frecvenţei de descărcare. Valoarea rezistenţei se va alege după valoarea curentului de scurtcircuit, în condiţiile de prelucrare date.

Tabela 6.1

Valori orientative pentru prelucrarea prin scîntei electrice

Degroşare			*Semifinisare*			*Finisare*		
Tensiunea, V	Curentul de scurt circuit, A	Capacitatea, μF	Tensiunea, V	Curentul de descărcare, A	Capacitatea, μF	Tensiunea, V	Curentul de scurt-circuit, A	Capacitatea, μF
50...200	15...30	150...500	100...150	5...15	30...150	30...90	0,2...1	0,25...15
—	—	—	100	30	600	100	5	10
—	—	—	100	15	200	100	0,25	2
202	40	500	220	8	100	220	0,4	6
220	24	300	220	4	50	220	0,32	4
220	16	200	220	2,4	30	220	0,16	2
—	—	—	220	0,8	10	—	—	—
100...150	10...30	400	40...100	2...10	40	20...40	0,1...2	4
200...250	12...50	300...2000	100...200	5...12	100...300	50...100	3...5	30...100

În tabela 6.1 sînt date cîteva valori orientative privind regimul electric pentru prelucrare prin scîntei.

În procesul de prelucrare prin scîntei electrice, electrodul-sculă suferă o uzură mult mai accentuată ca la prelucrările mecanice, datorită tensiunii negative care i se aplică în timpul descărcării (fig. 6.1). Pentru a se reduce această uzură, electrodul-sculă se confecţionează din materiale rezistente la uzură, cu o bună conductibilitate electrică şi termică, cu o temperatură de volatilizare ridicată, materiale uşor prelucrabile, cum sînt aliajele cupru-grafit, cupru-wolfram, nichel-wolfram etc.

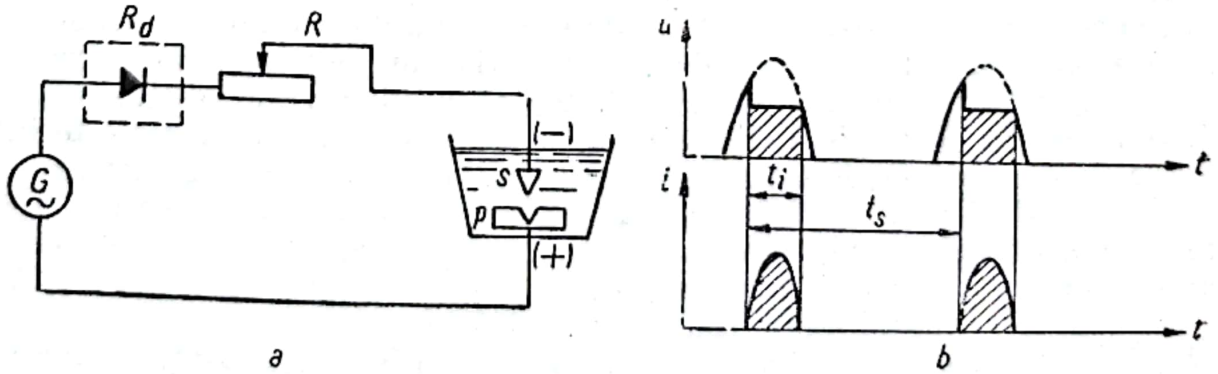


Fig. 6.2. *a* — Schema electrică de principiu a generatorului cu semiconductoare pentru prelucrarea prin impulsuri electrice:

G — sursă de curent alternativ; *Rd* — redresor cu semiconductoare; *R* — rezistor; *S* — sculă; *P* — piesă.

b — Variaţia tensiunii *u* şi a curentului *i* de descărcare.

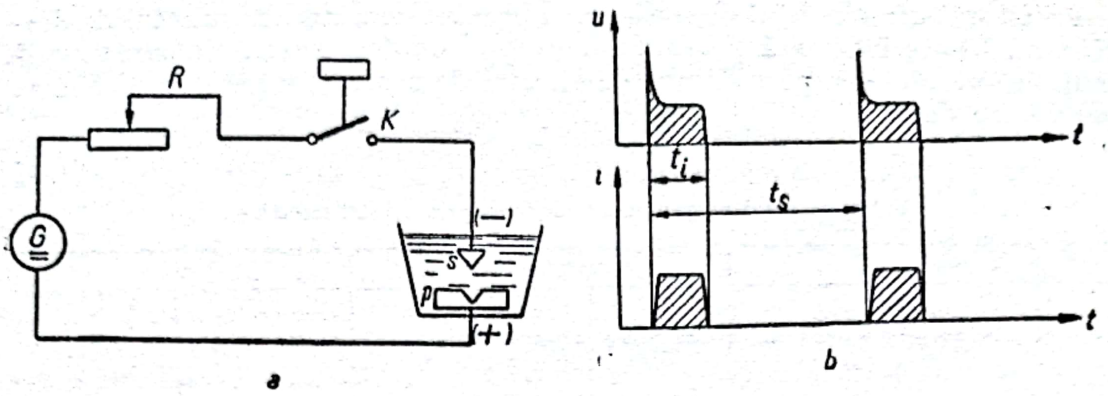


Fig. 6.3. *a* — Schema electrică de principiu a generatorului mecanic pentru prelucrarea prin impulsuri electrice:
G — sursă de curent; *R* — rezistor; *K* — contact comandat; *S* — sculă; *P* — piesă.
b — Variaţia tensiunii *u* şi a curentului *i* de descărcare.

Prelucrarea prin impulsuri electrice completează domeniul de prelucrare prin scîntei electrice, fiind utilizată la confecţionarea matriţelor şi a găurilor de dimensiuni mari şi, în general la prelucrări care implică detaşarea unui volum mare de material şi o suprafaţă mai puţin netedă.

Procedeul de prelucrare prin scîntei electrice prezintă o serie de dezavantaje şi anume o uzură pronunţată a electrodului, un timp de prelucrare ridicat (productivitate redusă) şi dependenţa mărimilor electrice de valoarea distanţei sculă-piesă. Pentru eliminarea acestora s-a recurs la obţinerea descărcărilor electrice cu ajutorul generatoarelor de impuls, la care forma, durata şi frecvenţa impulsurilor nu mai depind de distanţa sculă-piesă.

Generatoarele de impulsuri independente produc impulsuri sinusoidale (generatoare cu semiconductoare — fig. 6.2) sau dreptunghiulare (generatoare mecanice—fig. 6.3). Tensiunea impulsurilor rămîne totdeauna pozitivă, eliminîndu-se porţiunea negativă care constituie cauza uzurii exagerate a electrodului-sculă.

În cursul unei descărcări electrice de scurtă durată un anumit volum de metal se încălzeşte: straturile de metal de la suprafaţă sînt vaporizate, iar în adîncime se atinge temperatura de topire. Proporţia dintre volumul de metal vaporizat şi cel topit din volumul total al craterului format este în funcţie de durata impulsului şi anume, cu cît aceasta este mai scurtă, cu atît procentul de metal vaporizat este mai mare. Dacă impulsul se prelungeşte, procentul de metal vaporizat nu reprezintă decît o mică parte din volumul craterului, care rămîne în proporţie foarte ridicată în stare topită şi va avea dimensiuni mult mai mari.

Faţă de descărcarea prin scîntei, descărcarea prin impuls prezintă o durată t_i mai mare a impulsului ($10^{-2}...10^{-3}$s), avînd ca urmare dimensiuni sporite ale craterului şi o energie mai mare degajată în unitatea de timp, adică un debit mărit de metal erodat. La prelucrarea prin impulsuri randamentul este mai mare, însă în dauna calităţii suprafeţei.

Pentru electrodul-sculă se foloseşte cu bune rezultate cuprul, alama şi grafitul, iar ca dielectric se întrebuinţează uleiul mineral sau uleiul de transformator.

La prelucrarea prin electroeroziune, descărcarea electrică şi implicit procesul tehnologic, este condiţionată de menţinerea constantă a distanţei dintre electrozi, adică de tensiunea la electrozi. Pentru aceasta se utilizează sisteme de reglare automată a vitezei de deplasare a electrodului-sculă în funcţie de tensiune.

6.2. PRELUCRAREA ELECTROCHIMICA

Prelucrarea electrochimică se bazează pe eroziunea anodului-piesă introdus împreună cu catodul-sculă într-un electrolit (acid, bază, sare).

Acest procedeu face posibilă prelucrarea economică a oţelurilor rezistente la temperaturi înalte folosite mai ales în aeronautica spaţială, a carburilor metalice folosite pentru matriţe de prelucrat la cald.

Principiul prelucrării electrochimice este următorul: suprafaţa anodului-piesă (fig. 6.4) care nu este uniformă, datorită neregularităţilor microscopice, se găseşte în timpul electrolizei în două stări diferite— activă în proeminenţe şi pasivă în adîncituri. Ca rezultat al dizolvării anodice, în imediata apropiere a anodului se formează o peliculă subţire, vîscoasă, cu o rezistenţă electrică ridicată. Dacă rezistenţa peliculei este mai mare decît a electrolitului, curentul va trece prin porţiunile neacoperite sau slab acoperite de peliculă, adică prin proeminenţe. Întrucît aici densitatea curentului este cu mult mai mare decît în adîncituri, va avea loc dizolvarea rapidă a proeminenţelor.

Catodul-sculă execută o mişcare de avans şi nu este supus uzurii; el este confecţionat din cupru.

Erodarea electrochimică a oţelului este caracterizată de reacţia:

$$Fe + 2H_2O = Fe(OH)_2 + H_2,$$

cantitatea de metal dizolvat fiind dată de legea lui Faraday (rel. 5.1). La o densitate a curentului de 200 A/cm² rezultă un debit al dizolvării de 0,2 cm³/min.

O condiţie esenţială a prelucrării este asigurarea unei viteze de circulaţie suficiente (sub o presiune de 15—20 atm) a electrolitului prin interiorul electrodului-sculă, pentru a evita: depunderea pe catod a atomilor dizolvaţi ai anodului, îndepăr-

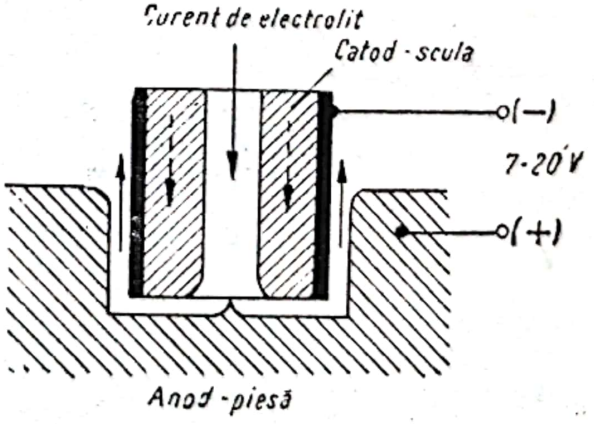


Fig. 6.4. Schema de principiu a instalaţiei de prelucrare electrochimică.

Scanned with OKEN Scanner

tarea hidrogenului depus pe catod şi vaporizarea posibilă a electrolitului dintre sculă şi piesă.

Prelucrarea electrochimică se deosebeşte fundamental de prelucrarea prin electroeroziune. Astfel, procedeul de electroeroziune se bazează pe topirea locală, la temperaturi de mii de grade, a particulelor de metal, în timp ce prelucrarea electrochimică se efectuează la cîteva zeci de grade (temperatura mediului ambiant).

La prelucrarea prin electroeroziune se produce o uzură a electrodului sculă; la prelucrarea electrolitică electrodul-sculă nu prezintă nici o uzură, deoarece nu se produc descărcări, electrolitul fiind bun conducător de electricitate. La prelucrarea prin electroeroziune fiecare scînteie scoţînd prin şoc o particulă din piesă, în locul respectiv va rămîne un mic crater; acesta va fi cu atît mai mare cu cît avansul electrodului-sculă este mai mare şi cu cît intensitatea curentului are o valoare mai ridicată. La prelucrarea electrolitică, în stratul dintre electrolit şi piesă avînd loc un schimb de sarcini electrice, prelucrarea metalului se realizează uşor, suprafaţa rămînînd fără defecte. În aceste condiţii debitul de metal îndepărtat prin prelucrare electrochimică ajunge la 35 cm³/min faţă de debitul de 10 cm³/min obţinut la prelucrarea electroerozivă.

6.3. PRELUCRAREA ANODO–MECANICĂ

Prelucrarea anodo-mecanică foloseşte o acţiune electrotermică şi electrochimică periodică, combinate cu o acţiune mecanică efectuată de o sculă. Această prelucrare poate fi de rectificare (mai ales ascuţirea sculelor cu plăcuţe din carburi metalice) şi de debitare (tăiere) a aliajelor metalice greu prelucrabile (oţel austenitic, oţel călit, carburi metalice, etc.).

Metoda de rectificare anodo-mecanică prezintă avantaje economice faţă de cea cu abrazive; procedeul de tăiere anodo-mecanică elimină bavurile, lăţimea tăieturilor este mai mică (de 1,5 ...2,5 mm), nu se produc modificări în structura materialului şi indicii tehnico-economici sînt mai buni decît în cazul tăierii prin procedee mecanice.

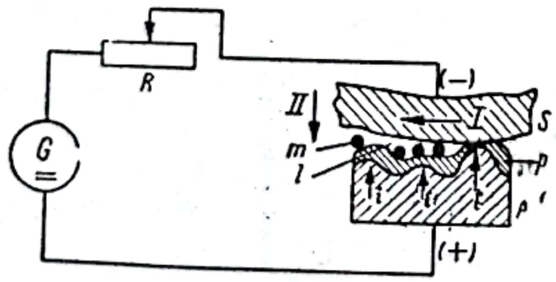


Fig. 6.5. Principiul prelucrării anodo-mecanice:

G — generator de curent continuu; *S* — catod-sculă; *P* — anod-piesă; *p* — peliculă; *m* — particulă metalică; *l* — electrolit; *i* — liniile de curent; *I* — mişcarea de rotaţie a sculei; *II* — mişcarea de avans a sculei.

Piesa de prelucrat *P* (fig. 6.5) se leagă la polul pozitiv al sursei de curent continuu, care produce o tensiune de 20...30 V. Catodul-sculă este realizat de obicei sub forma unui disc din oţel sau cupru. În spaţiul dintre electrozi se dirijează o vînă de electrolit lichid (sticlă solubilă), cu o concentraţie care se alege în funcţie de caracteristicile procesului de lucru. Sub acţiunea curentului electric, electrolitul formează o peliculă *p* care se prinde de electrodul-

piesă. Pelicula are o rezistenţă electrică ridicată şi împiedecă contactul direct între sculă şi piesă.

Scula are o mişcare de rotaţie şi o mişcare de avans spre piesa care se prelucrează. Acţiunea mecanică a sculei îndepărtează o parte din pelicula de pe suprafaţa piesei. În dreptul proeminenţelor microscopice ale piesei, pelicula este atît de mult subţiată, încît rezistenţa electrică de trecere între electrozi scade simţitor, ceea ce face ca cea mai mare parte a curentului să treacă prin aceste proeminenţe după direcţia liniilor de curent *i*. Densitatea de curent atingînd 20...30 A/mm², proeminenţele piesei sînt topite datorită căldurii produse prin efect Joule-Lenz ; o dată cu topirea are loc şi dizolvarea electrochimică a metalului piesei. Dacă densitatea de curent are o valoare mai mică se produce numai dizolvarea anodică.

Tabela 6.2

Regimul de lucru pentru tăierea anodo—mecanică

Diametrul piesei, mm	Intensitatea curentului, A	Tensiunea, V
10... 20	20... 40	20...22
20... 40	40... 80	20...22
40... 80	80...125	20...22
80...125	125...200	22...24
125...150	200...275	24...26
150...200	275...300	24...26
200...250	300...450	26...28

Pe măsura topirii şi a dizolvării proeminenţelor piesei, se formează alte proeminenţe, astfel că fenomenul continuă, cu condiţia de a se menţine constantă distanţa dintre electrozi.

Procesul de lucru la prelucrarea anodo-mecanică depinde deci de: mărimile electrice (tensiune, curent), parametrii mecanici (presiune, viteză etc.) şi proprietăţile electrolitului. În tabela 6.2 sînt date cîteva valori ale mărimilor electrice.

6.4 PRELUCRAREA PRIN CONTACT ELECTRIC

Prelucrarea prin contact electric foloseşte o acţiune electrotermică combinată cu acţiunea mecanică a sculei (disc sau sculă vibratoare). Piesa împreună cu scula sînt conectate într-un circuit electric de descărcare. Scula sau piesa are o mişcare de avans, astfel că procedeul de prelucrare prin contact este similar cu prelucrarea mecanică prin aşchiere, cu deosebirea că detaşarea metalului se produce prin descărcare electrică.

Prelucrarea prin contact se execută în aer liber ; apa, emulsia sau aerul comprimat sînt utilizate la răcirea electrodului-sculă şi nu ca parametri ai procesului de prelucrare.

Ţinînd cont de parametrii electrici şi mecanici ai procesului de lucru, prelucrarea prin contact electric se poate executa în următoarele variante:

— Prelucrarea caracterizată printr-o presiune mare a discului rotitor asupra piesei, asociată cu o tensiune redusă de 10...15 V. Căldura dezvoltată în rezistenţa contactului electric dintre sculă şi piesă înmoaie superfi-

Scanned with OKEN Scanner

cial materialul piesei, erodarea fiind produsă prin deplasarea sculei. Contactul dintre sculă şi piesă fiind în permanenţă asigurat de proeminenţele piesei, în această variantă nu apar descărcări electrice.

— Prelucrarea cu presiune redusă a discului combinată cu o tensiune ceva mai ridicată, de 20...25 V. Între sculă şi piesă se formează arcul electric care provoacă topirea materialului, îndepărtat apoi prin mişcarea sculei.

— Prelucrarea cu o tensiune de circa 36 V, fără a exercita nici o presiune între piesă şi discul rotitor. După amorsarea procesului de lucru prelucrarea continuă prin descărcarea în arc; temperatura ridicată a arcului topeşte şi volatilizează parţial metalul piesei.

La acest procedeu se foloseşte cu preponderenţă curentul alternativ şi mai rar curentul continuu.

Metoda se poate folosi la prelucrări de degroşare şi finisare, mai ales pentru aliajele greu prelucrabile cu alte metode. S-au făcut încercări, cu rezultate bune, de debitare a pieselor, frezare a danturilor, prelucrare a suprafeţelor elicelor de nave, prelucrarea de rodare a bilelor pentru rulmenţi etc.

6.5. PRELUCRAREA ELECTROHIDRAULICĂ

Prelucrarea electrohidraulică este o metodă de deformare ultrarapidă a metalelor, cu ajutorul unei unde de şoc, provocată de o puternică descărcare electrică sub formă de arc, folosind apa ca mediu de transmitere a acestei unde de şoc.

Sursa de alimentare a descărcării electrice este reprezentată de o baterie de condensatoare. În canalul arcului electric, curentul de descărcare (de ordinul a 10^4 A) produce o temperatură foarte ridicată. În cîteva microsecunde materialul din zona arcului electric este adus sub formă de plasmă, destinzîndu-se de $10^4...10^5$ ori. Mediul din imediata apropiere a arcului suferă o comprimare foarte mare, producîndu-se o undă de presiune care se propagă radial cu o viteză care o depăşeşte pe cea sonică (6 000—7 000 m/s). În imediata apropiere, unda de presiune are cîteva zeci de mii de atmosfere, scăzînd rapid pe măsură ce se îndepărtează de locul producerii. Această undă de presiune este de fapt o undă de şoc, deoarece ea acţionează întocmai ca o lovitură mecanică care plastifiază metalul la rece şi în consecinţă, îl poate deforma în sensul dorit.

În figura 6.6 este reprezentată deformarea electrohidraulică a unei table, descărcarea electrică fiind produsă de o bujie. Unda de şoc generată de scînteia bujiei se propagă prin apă şi împinge tabla în matriţa superioară. Pe camera de apă se montează o diafragmă flexibilă din cauciuc sau material plastic, pentru a preveni pătrunderea apei între tablă şi matriţă.

Scanned with OKEN Scanner

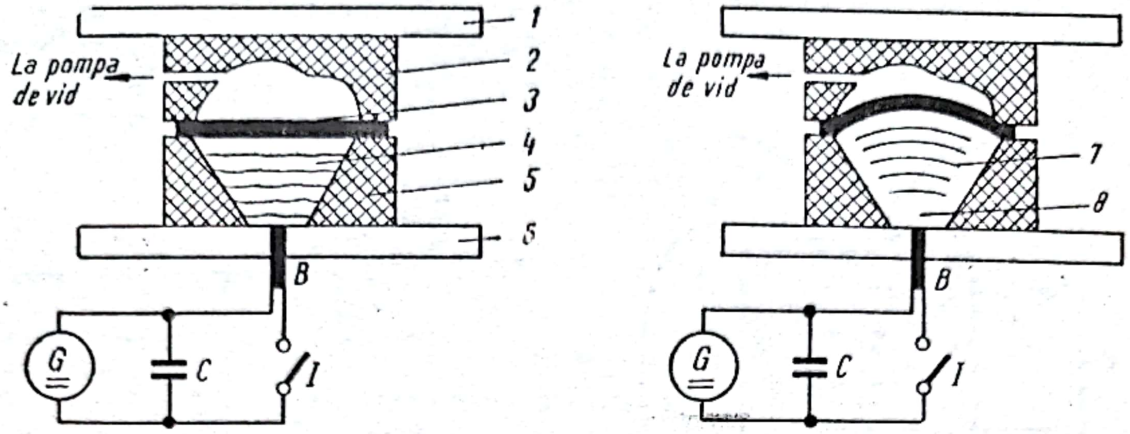


Fig. 6.6. Prelucrarea electrohidraulică a unei table:

a — faza inițială; *b* — faza finală. *G* — sursă de curent continuu; *C* — baterie de condensatoare; *I* — întreruptor; *B* — bujie; *1* — platou; *2* — matriță concavă; *3* — tablă; *4* — apă; *5* — camera de apă; *6* — batiu; *7* — unda de șoc; *8* — plasmă în zona aprinderii.

Avantajele acestei prelucrări sînt: fasonarea cu mare precizie și menținerea nealterată a finisării inițiale a semifabricatului, posibilitatea de formare a pieselor găurite în prealabil, reducerea costului și construcția simplificată a sculelor.

6.6. PRELUCRAREA ELECTROMAGNETICĂ

Prelucrarea electromagnetică este un procedeu de formare ultrarapidă cu ajutorul căruia se pot realiza presări, îndoiri și ambutisări de table, lărgiri, întinderi, îmbinări de țevi, presări de filete, asamblări de cabluri cu cleme, papuci și piese de legătură, asamblări de motoare electrice mici, consolidarea unor piese metalice pe piese ceramice etc.

Procedeul se utilizează în prezent atît pentru prelucrarea oțelurilor speciale, wolframului și molibdenului, cît și a cuprului, aluminiului, alamei, bronzurilor.

Prelucrarea electromagnetică prezintă următoarele avantaje față de procedeele clasice:

— grad de precizie foarte mare;

— energia transferată piesei care se prelucrează poate fi exact reglată, influențîndu-se corespunzător procesul de prelucrare;

— posibilitățile de prelucrare sînt extrem de variate, procedeul fiind convenabil atît la producția de unicate, cît și la producția de mare serie și în flux;

— se realizează economii mari de matrițe.

Principiul prelucrării electromagnetice se explică cu ajutorul figurii 6.7. Dacă în interiorul unei bobine cilindrice se stabilește pentru un timp foarte scurt ($6...20 \cdot 10^{-6}$ s) un cîmp magnetic foarte puternic (20...100 T) și dacă în interiorul bobinei se află un corp metalic (de exemplu o țeavă

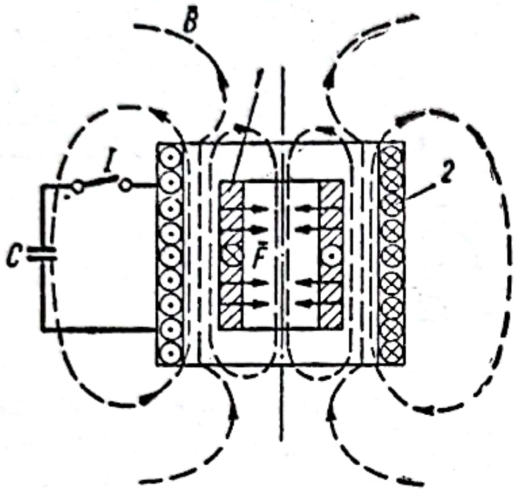


Fig. 6.7. Principiul prelucrării electromagnetice a unei ţevi conductoare:
1 — ţeavă; *2* — bobină inductoare.

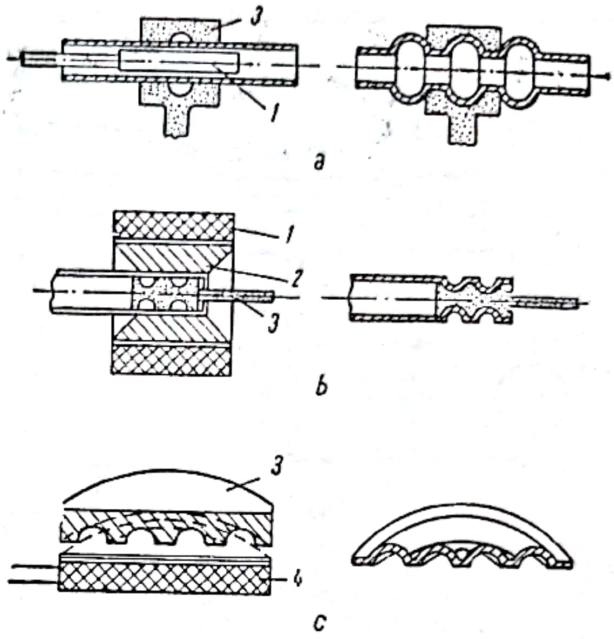


Fig. 6.8. Variante de bază ale prelucrării electromagnetice:
a — dilatare; *b* — comprimare; *c* — formare de table plane; *1* — bobină; *2* — modelator de cimp; *3* — matriţă; *4* — bobină plană.

metalică), atunci în ea se vor induce tensiuni ridicate, ca urmare a vitezei foarte mari de variaţie a cîmpului magnetic inductor. În ţeavă vor circula curenţi puternici şi asupra fiecărei porţiuni elementare de ţeavă va acţiona o forţă care tinde s-o preseze în sens radial (cîmpul magnetic în interiorul ţevii este anulat de cîmpul de reacţie al conductorului). Dacă această forţă este suficient de mare, astfel încît presiunea radială să depăşească limita de curgere a materialului, ţeava se deformează, micşorîndu-şi diametrul. Dacă în interiorul ţevii se află un dorn, ţeava va fi presată peste acesta şi va căpăta conturul lui.

În condiţiile prelucrării electromagnetice, la o inducţie de 30 T, revine o presiune de $3{,}5 \cdot 10^6$ kgf/cm², iar la 100 T se ajunge la $40 \cdot 10^6$ kgf/cm².

Prelucrarea electromagnetică are trei variante de bază, reprezentate în figura 6.8. În figura 6.8, *a* este reprezentat un dispozitiv cu bobina plasată în interiorul piesei cilindrice, care realizează mărirea diametrului acesteia pe anumite porţiuni. Figura 6.8, *b* reprezintă presarea unei piese cilindrice peste un dorn, executată cu o bobină exterioară piesei. A treia variantă este prelucrarea unei piese plane de tablă prin refularea ei în interiorul unei matriţe (fig. 6.8, *c*). În acest caz bobina este plană şi poate fi redusă la o singură spiră, primind denumirea de ciocan magnetic.

Cîmpul magnetic necesar prelucrării este obţinut prin descărcarea unei baterii de condensatoare, într-un timp extrem de scurt, pe o bobină inductoare. Procesul tranzitoriu complicat care are loc nu a fost studiat încă în amănunt; se pot face însă unele aprecieri calitative asupra transferului de energie care se produce.

Scanned with OKEN Scanner

Neglijînd la început pierderile Joule-Lenz în bobina inductoare şi în conductoarele de legătură dintre condensator şi bobină, se poate scrie că energia bateriei de capacitate C, încărcată la tensiunea U, se transformă în energia cîmpului magnetic

$$W_0 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \int B_1^2 \cdot dV. \qquad (6.2)$$

În această relaţie $\int B_1^2 \cdot dv$ este suma pătratelor inducţiilor B_1, în toate elementele de volum dv; practic, se ia în considerare numai spaţiul dintre bobină şi piesă, în care se concentrează cîmpul.

Presiunea care acţionează asupra piesei este egală cu densitatea de energie a cîmpului magnetic $B^2/2 \cdot \mu_0$. Exercitîndu-se asupra părţii din piesă care se află cel mai aproape de bobină, această presiune aduce întreaga secţiune a piesei în stare de curgere. Lucrul efectuat de cîmp pentru deformare este: forţa (presiune $\times$ suprafaţa A) $\times$ deplasarea s, deci

$$W_1 = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot A \cdot s. \qquad (6.3)$$

Trebuie să se aibă în vedere că, în timpul prelucrării, spaţiul dintre bobină şi piesă creşte, deci densitatea de energie scade, astfel că pentru $B^2/2 \cdot \mu_0$ se va lua o valoare medie pe durata prelucrării.

La sfîrşitul prelucrării, diferenţa $W_0 - W_1$ se găseşte teoretic în spaţiu sub forma energiei cîmpului. Aceasta este valabil însă numai în ipoteza că piesa are rezistenţă ohmică nulă şi că tensiunea indusă în ea produce un curent infinit, căruia îi corespunde un cîmp de reacţie care împiedică complet pătrunderea cîmpului primar. În realitate, prin piesă circulă un curent finit care permite pătrunderea cîmpului pe o anumită adîncime. Dacă δ este adîncimea de pătrundere a curentului în piesă, cîmpul inductor va cheltui energia

$$W_2 = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot A \cdot \delta, \qquad (6.4)$$

care se pierde prin efect Joule-Lenz în piesa ce se prelucrează.

Dacă $W_3 = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$ sînt pierderile prin efect Joule-Lenz în bobina inductoare, iar $W_4 = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \int B_2^2 \cdot dv$ este energia cîmpului la sfîrşitul prelucrării, atunci în cazul descărcării complete a condensatorului şi neglijînd cîmpul de dispersie în afara bobinei, rezultă următorul bilanţ energetic

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 + W_4. \qquad (6.4)$$

Practic, se obţin pentru W_1 (energia transferată piesei) valori cuprinse între 20 şi 40% din energia totală consumată, iar pentru W_2 (energia transformată în căldură în piesă), între 10 şi 20%. Restul apare ca efect termic în bobină.

Scanned with OKEN Scanner

Randamentul electric al prelucrării electromagnetice este scăzut, ceea ce are totuşi mică importanţă în raport cu avantajele remarcabile pe care le prezintă.

Maşinile de prelucrare electromagnetică construite în S.U.A. lucrează cu inducţii cuprinse între 200 şi 1 000 T, produse de condensatoare cu energia de 6...60 kJ, la tensiuni de 10...30 kV, descărcate automat printr-un întreruptor cu ignitroane.

Problema principală în realizarea bobinei inductoare este preluarea eforturilor mecanice care acţionează asupra ei. Pentru aceasta se utilizează:

— bobinaj elicoidal din discuri de cupru, care preiau eforturile radiale, cele axiale urmînd a fi suportate de bolţuri;

— un cilindru metalic masiv despicat în lungul unei generatoare (concentrator de cîmp), plasat între bobina inductoare şi piesa care se prelucrează. Datorită şliţului care împiedică închiderea unor linii de curent circulare, prin concentrator circulă un curent care la suprafaţa exterioară a cilindrului este opus curentului din bobină, iar în interior are acelaşi sens. În acest mod bobina este descărcată de efortul radial, dar randamentul procedeului scade întrucîtva;

— bobina pentru o singură prelucrare, neasigurată în nici un fel împotriva eforturilor ce apar, fiind lăsată să explodeze (sau să implodeze). Întrucît părţile bobinei care se deplasează radial au o anumită masă, este necesar un anumit timp pînă la distrugerea bobinei, timp mai mare decît pentru deformarea piesei. Soluţia este extrem de ieftină, pentru obţinerea unor presiuni pînă la 400 kgf/cm², însă necesită luarea unor măsuri speciale de protecţie.

Una din aplicaţiile speciale ale prelucrării electromagnetice — ciocanul magnetic, se obţine reducînd bobina inductoare la o singură spiră. Cel mai simplu ciocan magnetic este un disc de cupru găurit la centru, avînd o tăietură radială (fig. 6.9), alimentat cu un impuls de curent printr-o linie de inductivitate scăzută. Dacă această spiră este ţinută în apropierea unei

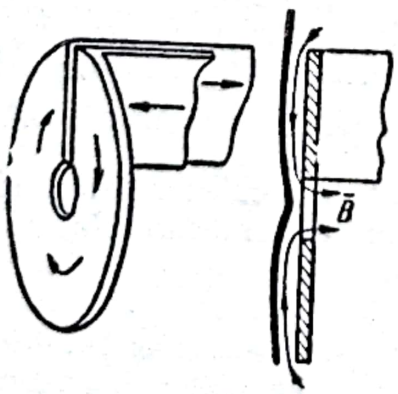


Fig. 6.9. Ciocan magnetic.

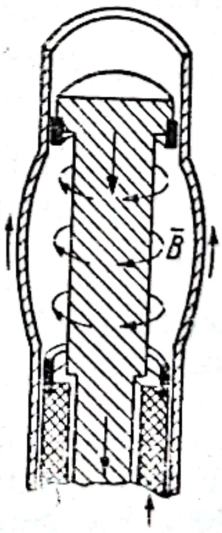


Fig. 6.10. Prelucrarea electromagnetică cu trecerea curentului prin piesă.

Scanned with OKEN Scanner

suprafeţe metalice, cîmpul magnetic creat de ea este comprimat între spiră şi tablă, iar pe suprafaţa tablei se exercită o presiune.

S-au realizat diferite tipuri de ciocane magnetice, la baza cărora stă principiul conform căruia presiunea magnetică este maximă în dreptul regiunii în care, pe suprafaţa ciocanului, liniile de curent au densitatea maximă.

Un alt procedeu de prelucrare electromagnetică este cel cu contact direct. Ideea pe care se bazează este de a transmite curentul electric direct în piesa ce se prelucrează, prin contact, în loc de a-l transmite prin inducţie. Un exemplu de aplicare a acestui procedeu este dat în figura 6.10, care reprezintă lărgirea unei ţevi folosind o linie de alimentare coaxială a cărei jumătate exterioară este chiar ţeava care trebuie lărgită.

Curentul este adus printr-un conductor cilindric şi aplicat piesei printr-un contact elastic din bronz. La partea superioară a ţevii se află un alt contact care conduce curentul într-un dorn central. Întrucît conductoarele parcurse de curenţi de sensuri opuse se resping, fiecare porţiune de suprafaţă a ţevii este supusă unui efort radial îndreptat în afară.

Scanned with OKEN Scanner

BIBLIOGRAFIE

Bibliografie generală

1. Hortopan, Gh. *Utilizarea energiei electrice.* Bucureşti, L.I.P. 1960.
2. Prisăcaru, V. ş. a. *Utilizările energiei electrice.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1969.
3. Văzdăuţeanu, V. *Utilizările energiei electrice.* Bucureşti, E.D.P., 1968.

Capitolul 1. **Instalaţii electrice de distribuţie la consumator**

4. Arie, E. ş. a. *Compensarea regimului deformant la instalaţii de redresare echipate cu baterii de condensatoare.* Studii şi cercetări de energetică, seria A, tomul XIII, nr. 2, 1963.
5. Boţan, N. V. ş. a. *Reţele electrice. Calculul electric,* Bucureşti, Editura tehnică, 1961.
6. Bădulescu, N. *Linii şi staţii electrice — îndrumător,* Bucureşti, ediţia III, Editura tehnică, 1967.
7. Cănescu, T. ş. a. *Instalaţii electrice de utilizare — îndreptar,* Bucureşti, Editura tehnică, 1968.
8. Chiriţă, Gh. ş. a. *Cartea instatorului electrician,* Bucureşti, Editura tehnică, 1970.
9. Comşa, D. ş. a. *Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor industriale — îndrumător de proiectare,* Cluj, L.I.P., 1969.
10. Corodeanu, I. *Curs de instalaţii electrice.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1964.
11. Cruceru, C. ş. a. *Conducte electrice — îndreptar,* ediţia II, Bucureşti, Editura tehnică, 1968.
12. Feldman, I. *Aparate de protecţie prin relee în curent operativ alternativ.* Bucureşti, I.D.T., 1967.
13. Grzybowski, S. ş. a. *Condensatoare în electroenergetică* — traducere din l. polonă, adaptată şi completată, Bucureşti, Editura tehnică, 1966.
14. Heinrich, I. *Partea electrică a centralelor şi staţiilor electrice — îndrumător de proiectare.* Timişoara L.I.P., 1967.
15. Hoppner, A. *Handbuch für Planung, Konstruktion und Montage von Schaltanlagen,* 3 Auflage, BBC Mannheim, 1965.
16. Hortopan, Gh. *Aparate electrice.* Bucureşti. Editura didactică şi pedagogică, 1967.
17. Ionescu, A. *Combaterea avariilor echipamentului din reţelele electrice cauzate de supratensiunile de rezonanţă armonică.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1968.

Scanned with OKEN Scanner

18. Kazak, N.A. ş.a. *Elektrosnabjenie promîşlenîh predpriatii.* Energhia, Moskva — Leningrad, 1966.
19. Mathé, B. ş.a. *Protecţia împotriva trăznetului a construcţiilor civile şi industriale.* Bucureşti, E.T., 1969.
20. Nagel, M. *Handbuch der Installationstechnik für Starkstromanlagen.* 2 Auflage, Berlin, VEB Verlag Technik, 1964.
21. Potolea, E. *Centrale şi reţelele electrice.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1962.
22. Prodea, V. *Construcţia şi exploatarea instalaţiilor electrice de iluminat din întreprinderile industriale.* Bucureşti, Editura tehnică, 1967.
23. Spînu, A. *Protecţia instalaţiilor de joasă tensiune.* Bucureşti, Editura tehnică, 1966.
24. Sufrim, M. ş. a. *Construcţia şi exploatarea instalaţiilor de legare la pămînt.* Bucureşti, Editura tehnică, 1970.
25. Vătămanu, O. *Instalaţii electrice de forţă de joasă tensiune — îndrumător de proiectare.* Timişoara, L.I.P. 1969.
26. * * * *Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor industriale,* colectiv Fedorov, A. A. ş. a. traducere din l. rusă, adaptată şi completată, Bucureşti, Editura tehnică, 1967.
27. * * * *Sisteme moderne de distribuţie a energiei electrice în întreprinderile industriale,* Bucureşti, I.D.T., 1965.
28. * * * *AEG — Hilfsbuch.* Neunte Auflage, Allgemeine Elektrizitäts — — Gesellschaft, Berlin, Grünewald, 1965.
29. * * * *Manualul inginerului electrician, vol. VII.* Bucureşti, Editura tehnică, 1958.
30. * * * *Normativ pentru proiectarea şi executarea instalaţiilor electrice interioare cu tensiuni pînă la 1000 V,* I. 7 — 68, CSCAS — 1968.
31. * * * *Regulamentul pentru furnizarea şi utilizarea energiei electrice* — — HCM 2763/68.
32. * * * *M.E.E. — Instrucţiuni privind ameliorarea factorului de putere la consumatorii industriali şi similari de energie electrică.* E 43—67 — Oficiul de documentare şi publicaţii tehnice, Bucureşti, 1968.

Capitolul 2. **Iluminatul electric**

33. Băilescu, Al. ş. a. *Iluminatul electric.* Îndreptar, ediţia II revăzută, Bucureşti, Editura tehnică, 1969.
34. Deribéré, M. *Principes fondamentaux de la technique de l'éclairage.* Paris, Dunod, 1965.
35. Elenbaas, W. ş. a. *Les lampes fluorescentes et l'éclairage.* Bibliothèque technique Philips, 1963.
36. Faragó, Gy. ş. a. *Világítástechnika.* Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1962.
37. Gheorghiu, N. ş.a. *Teoria şi practica iluminatului electric.* Bucureşti, E.T., 1970.
38. Iansen, I. *Technique de l'éclairage.* Bibliothèque technique Philips — 1956.
39. Rohlin, G. N. *Gazorazriadnîe istociniki sveta.* Moskva — Leningrad, Izd. Energiia, 1966.
40. Roy-Pochon, C. *L'éclairage industriel.* Sodel, Paris — 1959.
41. Schapira, W. *Realizări noi în iluminatul electric,* vol. I, Bucureşti, I.D.T. 1968.
42. Sturm, C. H. *Vorschaltgeräte und Schaltungen für Niederspannungs — Entladungslampen,* 4 Auflage, B.B.C. Mannheim, 1963.
43. * * * I.E.S. Lighting Handbook, IV-th Edition, New-York, 1966.
44. * * * *Concepţii actuale şi realizări noi în domeniul iluminării locului de muncă.* Bucureşti, I.D.T., 1965.
45. * * * *Realizări recente în iluminatul locului de muncă,* Bucureşti, I.D.T. 1965.
46. * * * *Choosing Light Sources for General Lighting.* În: Iluminating Engineering, mai 1967.
47. * * * STAS 6646—66

Scanned with OKEN Scanner

Capitolul 3. **Electrotermie**

48. Altgauzen, A. P. ş. a. *Eclectrotermiceskoe oborudovanie-spravocinik.* Moskva, Energhiia, 1967.
49. Angot, A. *Complemente de matematici pentru inginerii din electrotehnică şi din telecomunicaţii* (§.7.5.), Bucureşti, Editura tehnică, 1965.
50. Beji, S. D. *Indukciós hevítés.* Budapest, Műszaki könyvkiadó, 1965.
51. Berman, A. ş. a. *Incălzirea şi uscarea cu radiaţii infraroşii,* Bucureşti, Editura tehnică 1957.
52. Braşovan, M. *Electrotermie.* Timişoara, L.I.P., 1954.
53. Brokmeier, K. H. *Induktives Schmelzen.* BBC Mannheim, 1966.
54. Centea, O. *Electrotermie şi sudare electrică.* vol. I. Timişoara, L. I. P., 1959.
55. Grave, H. F. *Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice,* Bucureşti, E. T., 1966.
56. Gruber, G. *Plavka metalov elektronîm luciom.* Moskva, Inostranaia Literatura, 1963.
57. von Hippel, A.R. *Les dielectriques et leurs applications.* Dunod, Paris, 1961.
58. Jezierski, E. ş.a. *Transformatoare electrice* — traducere din l. polonă, adaptată şi completată, Bucureşti, E. T., 1966.
59. Kneule, F. *Le séchage.* Eyrolle, Paris, 1964.
60. Lauster, F. *Elektrowärmetechnik.* Stuttgart, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1964.
61. Nicolescu, E. ş. a. *Maşini electrice fabricate în R.P.R.* Bucureşti, Editura tehnică , 1965.
62. Okorokov, N. V. *Elektromagnitnoe peremensivanie metalla v dugovîh staleplavilnîh peciah.* Moskva, Metalurgizdat, 1961.
63. Papadache, I. *Automatica aplicată,* Bucureşti, Editura tehnică. 1965.
64. Popa, B. ş. a. *Termotehnică şi maşini termice.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1969.
65. Romanov, D. I. *Elektrokontaktnîi nagrev metallov.* Maşinostroenîie, Moskva, 1965.
66. la Toison, M. *Infrarouge et applications thermiques.* Paris, Eyrolles, 1964.
67. Trelle, K. *Das Anschliessen konduktiver Standerwärmungsanlagen an das Versorgungsnetz.* În: BBC — Nachrichten, nr. 11, 1966.

Capitolul 4: **Sudarea electrică**

68. Antonescu, I. ş. a *Sudarea prin presiune,* Bucureşti, Editura tehnică, 1969.
69. Beckert, M., ş. a. *Grundlagen der Schweisstechnik.* Berlin, VEB Verlag Technik, 1963.
70. Centea, O., ş. a. *Maşini şi aparate pentru sudarea electrică.* Bucureşti, E. T., 1967.
71. Kristyak, E. *Hegesztőberendezések.* Budapest, Táncsics könyvkiadó, 1967.
72. Moravskii, V. E. *Svarka akkumulirovannoi energhiei.* Kiev, Izd. Tehn. Literaturî, 1963.
73. Popovici, V., ş. a. *Utilajele sudării electrice.* Bucureşti, Editura tehnică, 1968.
74. Popovici, V. ş. a *Automatizarea proceselor tehnologice ale sudării.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1965.
75. Sălăgean, T., ş. a. *Plasma termică pentru tăierea, sudarea, şi acoperirea metalelor.* Bucureşti, Editura Academiei, 1969.
76. * * * *Sudarea metalelor.* Sub coordonarea acad. Corneliu Miklosi, Bucureşti, Editura tehnică, 1965.

Capitolul 5: **Electrochimie şi electrometalurgie**

77. Atanasiu, I. A. *Manual de electrochimie generală.* Bucureşti, Editura didactică şi pedagogică, 1963.
78. Facsko, Gh. *Tehnologia electrochimică.* Bucureşti, Editura tehnică, 1969.
79. Oprean, L. ş. a. *Indreptar galvanotehnic.* Bucureşti, Editura tehnică, 1969.
80. Moseanu, Al. *Redresoare cu siliciu.* Bucureşti, Editura tehnică, 1966.

Scanned with OKEN Scanner

81. Vainer, I. V. *Utilajul secțiilor galvanice.* București, Editura tehnică, 1963.
82. * * * *Manualul inginerului electrician.* vol. VIII. București, Editura tehnică, 1959.

Capitolul 6: **Prelucrarea electrică a metalelor**

83. Diaconescu, I. ș. a. *Tehnologia prelucrării prin așchiere.* București, Editura tehnică, 1965.
84. Dobrescu, P. *Metode și utilaje moderne de electroprelucrare.* București, I.D.T., 1968.
85. Popilov, L. I. ș. a. *Prelucrarea electrică a metalelor.* București, Editura tehnică, 1969.
86. Popovici, C., ș. a. *Tehnologia construcției de mașini.* București, Editura didactică și pedagogică, 1967.

Scanned with OKEN Scanner

Coli de tipar: 25,—
Tiraj: 3 000+120 ex. leg.
Apărut: 1973.

Întreprinderea poligrafică Cluj
str. Brassai nr. 5—7
Republica Socialistă România
Comanda nr. 205/5051

Scanned with OKEN Scanner